

Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

---

# **Proposta de modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial

**Autor**

**Reginaldo Carreiro Santos**

**Orientador**

**José Luís Ferreira Martinho**

Professor do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Abril, 2018**



# Resumo

Recentemente, o desenvolvimento e aplicação de tecnologias inovadoras e disruptivas em ambientes industriais, está moldando a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Essas tecnologias possibilitarão aumento de produtividade, flexibilidade e adaptabilidade dos processos de negócio, e um relacionamento mais próximo com os clientes e com as demais empresas da cadeia de valor. É esperado que elas impactem profundamente o nível de competitividade dos negócios do futuro, e as sociedades como um todo. As fábricas inteligentes do futuro serão sistemas complexos, formando uma rede digital de informações e tomada de decisões em tempo real. Serão exigidas novas competências dos trabalhadores, com a criação de novos modelos de negócios e novas profissões, contemplando um crescimento da interação homem-máquina. Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo para avaliar o nível de maturidade na implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 em empresas de manufatura. Ele pode ser utilizado para medir o estado atual (diagnóstico inicial e avaliações de monitoramento), e para planejar o estado futuro desejado (objetivo). Foi realizada uma revisão de literatura da Indústria 4.0, contemplando as definições e conceitos envolvidos, as principais tecnologias intervenientes, os impactos nos negócios e na sociedade, a abordagem da Indústria 4.0 em diversos países, além dos desafios de implementação e consolidação das tecnologias e conceitos em ambientes industriais. Foi feita também uma análise comparativa de modelos de maturidade da Indústria 4.0 existentes, para justificar o modelo proposto. Foram realizadas ainda entrevistas com engenheiros e gestores de indústrias relevantes, para validar o modelo e colher contribuições de melhoria junto ao público-alvo, e também para proceder a testes piloto para simular a aplicação do modelo, a fim de avaliar a sua usabilidade e eficácia em medir as capacidades de transformação propostas. É pretendido que o modelo desenvolvido seja uma ferramenta prática e objetiva, para auxiliar profissionais e empresas a avaliarem os níveis de maturidade na implementação dos conceitos e tecnologias relacionados à Indústria 4.0, e também auxiliar pesquisadores acadêmicos a estudarem e aumentarem o conhecimento científico a respeito das profundas transformações esperadas para os negócios e para as sociedades.

Palavras-chave: Indústria 4.0; modelo de maturidade; manufatura avançada; manufatura inteligente



# Abstract

In recent years, the development and application of innovative and disruptive technologies in manufacturing environments is shaping the fourth industrial revolution, also known as Industry 4.0. Such technologies will enable an increasing in productivity, flexibility, and adaptability of business processes, and a closer relationship with customers and further companies in the value chain. It is expected that they deeply affect the competitiveness level of future business, and societies as a whole. Smart factories of the future will be complex systems, creating a digital network of online information and decision making. New labor skills will be required, with the creation of new business models and professions, considering a growth in human-machine interaction. This research had as its main objective the development of a maturity model to assess the maturity level in implementing the Industry 4.0 concepts and technologies in manufacturing companies. It can be used to measure the current state (initial diagnostic and monitoring assessments), and to plan the future desired state (goal). It was performed a literature review of the Industry 4.0, contemplating the definitions and related concepts, the key intervening technologies, the impacts in business and in society, the Industry 4.0 approach in various countries, besides the challenges of implementing and consolidating these technologies in industrial environments. Additionally, a comparative analysis of existent Industry 4.0 maturity models was performed, to justify the proposed model. Interviews were conducted with engineers and managers of relevant industries to validate the model and acquire model's improvement inputs from its target audience, and also to run pilot tests to simulate the model application, in order to evaluate its usability and effectiveness in measuring the proposed transformation capabilities. It is expected that the developed model becomes a practical and objective tool, to help professionals and companies to assess their maturity levels in implementing the Industry 4.0 related concepts and technologies, and to help academic researchers to study and enhance the scientific knowledge concerning the deep expected transformations to business and societies.

Key words: Industry 4.0; maturity model; advanced manufacturing; smart manufacturing



# Índice Geral

Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e abreviaturas .....	xi
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Justificativa e objetivos .....	3
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Conceitos e definições da Indústria 4.0 .....	7
2.2. Tecnologias habilitadoras e aplicações industriais .....	15
2.2.1. Sistemas ciber-físicos.....	16
2.2.2. Internet das coisas e serviços.....	18
2.2.3. Arquitetura orientada a serviços e computação em nuvem.....	18
2.2.4. <i>Big Data Analytics</i> .....	20
2.2.5. Computação visual.....	21
2.2.6. Dispositivos e aplicações móveis .....	22
2.2.7. Equipamentos autônomos e inteligência artificial .....	22
2.2.8. Tecnologias de manufatura aditiva .....	23
2.3. Impactos da Indústria 4.0 nas transformações econômicas e sociais .....	24
2.4. Iniciativas e programas da Indústria 4.0 em diversos países.....	26
2.4.1. Alemanha – Plattform Industrie 4.0 e o Smart Factory .....	27
2.4.2. Estados Unidos e Canadá .....	28
2.4.3. China - <i>Made in China 2025</i> .....	29
2.4.4. Iniciativa europeia - <i>Factories of the future</i> (FoF) .....	30
2.4.5. Iniciativa Portugal i4.0 .....	30
2.4.6. Iniciativa da Indústria 4.0 no Brasil .....	32
2.4.7. Comparação sintética entre as iniciativas dos países analisados .....	33
2.5. Desafios e tendências para implementação da Indústria 4.0 .....	34
2.6. Análise de modelos de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 .....	39
2.6.1. Guia de avaliação de maturidade da Acatech.....	40
2.6.2. Modelo de avaliação de maturidade de adaptação de empresas de manufatura à Indústria 4.0 de Schumacher et al. (2016) .....	45
2.6.3. Modelo IMPULS-VDMA – Autoavaliação de preparação de empresas para a Indústria 4.0 .....	47
2.6.4. Análise comparativa dos modelos de avaliação de maturidade pesquisados.....	52

<b>3. DESENVOLVIMENTO E TESTE EMPÍRICO DE MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 .....</b>	<b>61</b>
3.1. Metodologia de desenvolvimento do modelo.....	61
3.2. Elaboração, validação e teste do modelo de maturidade.....	64
3.2.1. Etapas 1 e 2 – Definição do escopo e projeto do modelo .....	64
3.2.2. Etapa 3 – Composição e validação do modelo .....	65
3.2.2.1.1. Dimensões .....	66
3.2.2.1.2. Capacidades de transformação .....	68
3.2.2.1.3. Níveis de maturidade .....	71
3.2.2.1.4. Questões da avaliação:.....	74
3.2.3. Etapa 4 – Teste piloto do modelo .....	77
3.2.4. Etapas 5 e 6 – Distribuição e manutenção do modelo .....	84
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>
ANEXO I – CAPACIDADES DE TRANSFORMAÇÃO – DESCRIÇÃO E RELAÇÃO COM CONCEITOS E TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	97
ANEXO II – QUESTÕES ORIENTADORAS DA AVALIAÇÃO.....	103
ANEXO III – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO DO MODELO DE MATURIDADE NAS EMPRESAS SELECIONADAS .....	107
ANEXO IV – RESULTADOS OBTIDOS NA APLICAÇÃO DO TESTE PILOTO DO MODELO DE MATURIDADE NAS EMPRESAS SELECIONADAS.....	109



# Índice de Figuras

Figura 1 - Processo de adaptação corporativo - adaptado de Schuh et al. (2017) .....	14
Figura 2 - Níveis de maturidade na transformação para a Indústria 4.0 - adaptado de Schuh et al. (2017).....	42
Figura 3 – Avaliação da maturidade das áreas estruturais - adaptado de Schuh et al. (2017) .	44
Figura 4 - Resultado da avaliação de maturidade uma empresa austríaca do setor de aviação – adaptado de Schumacher et al. (2016).....	47
Figura 5 - Níveis de maturidade do modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 – IMPULS-VDMA – adaptado de Lichtblau et al. (2015).....	50
Figura 6 – Fases do processo de desenvolvimento de modelos de maturidade – adaptado de De Bruin et al. (2005) .....	61
Figura 7 – Classificação de maturidade das dimensões da “empresa 1” .....	80
Figura 8 - Classificação de maturidade das dimensões da “empresa 2” .....	83



# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Definições e conceitos da Indústria 4.0 .....	10
Tabela 2 – Multicamadas de arquitetura orientada a serviços (SoA) – adaptado de Xu et al. (2014) .....	20
Tabela 3 – Ações de resposta das empresas conforme o nível de maturidade – adaptado de Lichtblau et al. (2015) .....	36
Tabela 4 - Áreas estruturais, princípios e capacidades de transformação (Schuh et al., 2017) .....	43
Tabela 5 - Itens de avaliação de maturidade propostos por Schumacher et al. (2016) .....	45
Tabela 6 – Capacidades de transformação propostas por Lichtblau et al. (2015) .....	48
Tabela 7 – Comparação das dimensões dos modelos analisados .....	53
Tabela 8 - Comparação dos aspectos comportamentais e de gestão dos subcomponentes dos modelos analisados .....	55
Tabela 9 - Comparação dos aspectos técnicos dos subcomponentes dos modelos analisados .....	57
Tabela 10 - Comparação dos aspectos externos às empresas dos subcomponentes dos modelos analisados .....	58
Tabela 11 - Comparação dos aspectos de mercado dos subcomponentes dos modelos analisados .....	58
Tabela 12 – Comparação das dimensões propostas com as dimensões do modelo de referência .....	66
Tabela 13 – Descrições das dimensões propostas no modelo .....	67
Tabela 14 – Comparação das capacidades propostas com as capacidades do modelo de referência .....	68
Tabela 15 – Capacidades da dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais” .....	97
Tabela 16 – Capacidades da dimensão “Equipes de trabalho” .....	98
Tabela 17 – Capacidades da dimensão “Fábricas inteligentes” .....	99
Tabela 18 – Capacidades da dimensão “Processos inteligentes” .....	100
Tabela 19 – Capacidades da dimensão “Produtos e serviços inteligentes” .....	101



# Simbologia e abreviaturas

<b>3D</b>	– Três dimensões
<b>AMP</b>	– Advanced Manufacturing Partnership
<b>AR</b>	– Augmented reality
<b>BI</b>	– Business intelligence
<b>BITKOM</b>	– Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien
<b>CAD</b>	– Computer-aided design
<b>CBR</b>	– Case-based reasoning
<b>CIM</b>	– Computer integrated manufacturing
<b>CMMI</b>	– Capability maturity model integration
<b>CNC</b>	– Computer Numeric Control
<b>CNI</b>	– Confederação Nacional da Indústria
<b>COBIT</b>	– Control objectives for information and related technology
<b>COPIN</b>	– Conselho Temático Permanente de Política Industrial e Desenvolvimento Tecnológico
<b>CPS</b>	– Cyber-physical systems
<b>DFKI</b>	– Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
<b>ERP</b>	– Enterprise resource planning
<b>FoF</b>	– Factories of the Future
<b>GPS</b>	– Global positioning system
<b>IAMM</b>	– Industrial analytics maturity model
<b>ICT</b>	– Information and communication technologies
<b>IIC</b>	– Industrial internet consortium
<b>IMSC</b>	– Intelligent Manufacturing System Centre
<b>IoT</b>	– Internet of things
<b>IIoT</b>	– Industrial internet of things
<b>IoTS</b>	– Internet of things and services
<b>ISO</b>	– International Organization for Standardization
<b>ITIL</b>	– Information Technology Infrastructure Library
<b>KDD</b>	– Knowledge Discovery in Databases
<b>M2M</b>	– Machine-to-machine
<b>MCTIC</b>	– Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
<b>MDIC</b>	– Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio
<b>MES</b>	– Manufacturing Execution System
<b>NNMI</b>	– National Network for Manufacturing Innovation
<b>OT</b>	– Operation technologies
<b>P&amp;D</b>	– Pesquisa e desenvolvimento
<b>PIB</b>	– Produto interno bruto
<b>PLC</b>	– Programmable Logic Controller
<b>PLM</b>	– Product Lifecycle Management
<b>PMI</b>	– Project Management Institute
<b>RFID</b>	– Radio-Frequency Identification

**SoA** – Service oriented architecture

**TI** – Tecnologia de informação

**VDMA** – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

**VR** – Virtual reality

**WCM** – World Class Manufacturing

**ZVEI** – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento do tema

A crescente demanda mundial por produtos e serviços, a competitividade internacional das cadeias de abastecimento, e principalmente os avanços tecnológicos de *hardwares* e *softwares*, têm resultado na evolução dos sistemas de manufatura e logística industriais. As recentes tecnologias aplicadas à manufatura têm o potencial de trazer mudanças significativas nas cadeias produtivas dos mais diversos segmentos, e geram expectativas de alterações disruptivas dos meios de produção e distribuição de bens e serviços. As tecnologias disruptivas são aquelas que têm capacidade de multiplicar a produtividade das empresas, e também de ofertar novos produtos e serviços, que não eram possíveis com as tecnologias anteriores.

Ao longo da história da industrialização, surgiram produtos, conceitos e tecnologias produtivas, que reunidos, propiciaram mudanças disruptivas e que foram consideradas revoluções industriais. Essas revoluções não são marcos no tempo, ou seja, não existe uma data específica que define cada uma delas, pois as grandes mudanças foram construídas ao longo de vários anos. Com elas, houve alterações nas matrizes energéticas em todo o mundo, surgiram novos produtos, novos materiais, novos processos de produção, novos equipamentos e ferramentas, novos meios de comunicação, e também novas organizações sociais e laborais. Portanto, essas transformações foram acompanhadas de profundas mudanças sociais e econômicas nas sociedades em que se instituíram.

A primeira revolução industrial teve início na Inglaterra em meados do século XVIII, e expandiu-se para outros países da Europa, e posteriormente para os Estados Unidos e Japão. Teve como principais marcos a utilização da máquina a vapor como força motriz para navios e locomotivas, com a criação das primeiras ferrovias, e para a produção têxtil, com a introdução de teares mecânicos, a utilização do aço em produtos siderúrgicos e a utilização do carvão como principal fonte energética nas fábricas. Foi um período que marcou a transição da produção artesanal e manual para a escala industrial, com a utilização de máquinas e ferramentas motorizadas, sendo também um período de grande impulso do capitalismo industrial, com a colonização de diversos territórios pela Inglaterra e pela França, e por uma busca por matérias-primas. Essas mudanças resultaram em grandes aumentos da produtividade dos fabricantes e do comércio entre os países, além de profundas transformações sociais e geográficas, com o surgimento de diversas novas profissões, novos produtos, novas fábricas, e um grande crescimento das cidades.

Diante dos novos meios de produção e de transporte descritos acima, seguiu-se um período de intenso desenvolvimento de novos produtos, que caracterizaram a segunda revolução industrial, entre meados do século XIX e meados do século XX. A utilização de combustíveis derivados do petróleo e dos motores a explosão, as aplicações da eletricidade, modificaram profundamente os produtos e os meios de produção e de comunicação neste período. Foram inventados o avião, veículos automotores (como o automóvel, motocicletas, caminhões e ônibus), o telefone, o rádio, o telégrafo, a televisão, diversos produtos químicos, entre outros importantes inventos, boa parte deles com aplicações militares devido aos avanços técnicos e científicos, que marcaram o período das grandes guerras. Com relação à indústria, o uso do aço e de outros metais foi intensificado com a indústria automobilística, que foi pioneira

na implantação das linhas de produção, e no estudo científico dos métodos de trabalho, dando origem à produção em massa.

A terceira revolução industrial é compreendida entre o final da segunda guerra mundial, em meados do século XX, até os dias de hoje. É marcada pelo uso da informática, da microeletrônica, das telecomunicações, pelo surgimento da internet, pelo avanço da robótica, pelos grandes avanços na medicina, com modernos equipamentos de diagnóstico e de tratamento, pelo desenvolvimento da genética e da biotecnologia, entre outros grandes avanços tecnológicos como os computadores e dispositivos pessoais, possibilitados pelas tecnologias de processamento e armazenamento de dados. Também tiveram importância os estudos dos impactos ambientais causados pela ação humana, e o surgimento de novas potências econômicas e industriais como o Japão, a Alemanha e a China. O crescimento da indústria automobilística e a maior utilização de combustíveis fósseis, fortaleceram a indústria do petróleo, matéria-prima que foi responsável por profundas mudanças na política e nas relações internacionais, marcadas pela globalização e formação de blocos comerciais.

Na sequência das grandes transformações descritas acima, diversas tecnologias têm emergido e sido potencializadas, bem como novos conceitos de gestão empresarial possibilitados por estas tecnologias, no que convencionou-se chamar de quarta revolução industrial ou Indústria 4.0. Ela é uma combinação da evolução dos sistemas ciber-físicos (*Cyber-physical systems* - CPS), da internet das coisas (*Internet of things* – IoT), da miniaturização através da micro e nanotecnologias, da computação em nuvem, da inteligência artificial, dos sistemas autônomos, da manufatura aditiva (impressão 3D), do *Big Data*, entre outras tecnologias e conceitos relevantes. Novos conceitos como a customização em massa, a servitização dos negócios, a digitalização de equipamentos, produtos e processos, a adaptabilidade dos sistemas, são responsáveis por uma profunda mudança no mundo dos negócios. Isoladamente, cada uma das tecnologias e conceitos pode contribuir para ganhos incrementais de produtividade e flexibilidade nas organizações. Mas em conjunto, a integração deles tende a alterar profundamente a competitividade das empresas e das cadeias de abastecimento. Pois até mesmo o conceito de competitividade empresarial foi e está sendo alterado devido às novas tecnologias de produção e distribuição. Kagermann, H. et al (2013) afirmam que a introdução da internet das coisas e serviços (IoTS) na manufatura está conduzindo à quarta revolução industrial, e no futuro, os negócios estabelecerão redes de comunicação que irão incorporar suas máquinas, sistemas de armazenagem e recursos de produção, e através dos CPS, serão capazes de trocar informação, gerando ações e controlando uns aos outros de forma autônoma.

A quarta revolução industrial está em curso, e da mesma forma como ocorreu com as revoluções anteriores, não existe um marco temporal que a defina. Os países desenvolvedores de alta tecnologia, nomeadamente Estados Unidos, Canadá, Japão, China, alguns países da Europa, Austrália e alguns países asiáticos, são os grandes intervenientes destas transformações. Isso se deve essencialmente ao grande investimento que as empresas e governos destes países fazem em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia. Mas uma das grandes diferenças desta revolução para as anteriores, é a velocidade de disseminação e adaptação das mudanças nos demais países, essencialmente devido à grande presença de empresas multinacionais, ao maior volume de comércio a nível mundial e à disseminação do conhecimento através das modernas tecnologias de comunicação. Desta forma, as tecnologias



são propagadas de maneira muito rápida e conseguem, em curtos espaços de tempo, chegar aos demais países, provocando mudanças estruturais em todo o ciclo de vida dos negócios, desde a concepção de produtos até a distribuição ao cliente final.

As consequências dos impactos sociais e econômicos ainda não estão claramente definidas, mas o que se espera é um aumento na utilização de tecnologias e sistemas inteligentes, que poderão trazer ganhos de produtividade e uma maior flexibilidade para as indústrias de manufatura e de serviços. O grau de adaptação das empresas e governos ao novo cenário que se apresenta é uma função que depende de diversas variáveis, mas assim como ocorreu nas revoluções industriais anteriores, os desdobramentos dessa revolução atingirão a todos os países. Então, quanto mais rápido for o processo de aprendizagem e implementação dos novos conceitos e tecnologias trazidos pela Indústria 4.0, maiores serão as vantagens a serem obtidas pela sua utilização. É fundamental que as organizações e os governos estejam preparados para absorverem os potenciais benefícios gerados por elas, e para as consequências sociais e econômicas, como por exemplo a profunda alteração das necessidades de aperfeiçoamento das competências dos trabalhadores, para se adequarem às tecnologias emergentes.

## **1.2. Justificativa e objetivos**

A principal motivação para este trabalho, foi estudar, analisar, adaptar e disseminar conhecimentos e ferramentas relacionados à Indústria 4.0, que possam auxiliar profissionais e empresas a compreenderem as lacunas de competências necessárias para competirem no novo cenário de alta tecnologia, alta produtividade, alta flexibilidade e alta competitividade. A escolha se deu em razão de a Indústria 4.0 ser um tema muito atual, e propiciar o aprendizado de competências multidisciplinares e complementares à engenharia industrial, como a mecatrônica, sistemas de informação, entre outras. E também por ser um tema com grande potencial de transformação da competitividade industrial, e de geração de novos produtos, novos negócios e novos serviços agregados a produtos existentes.

Outra motivação foi a de conhecer na prática como as empresas estão lidando atualmente com os avanços tecnológicos, e de que forma elas conseguem beneficiar desses avanços para melhor entendimento e satisfação das necessidades dos consumidores, para aumentarem a produtividade, reduzirem custos e serem mais competitivas.

O presente trabalho teve como objetivo geral o estudo dos conceitos e das tecnologias relacionados à Indústria 4.0 e a avaliação e comparação do grau de aplicação dos mesmos em empresas industriais. A partir destes objetivos gerais, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo de avaliação de maturidade do grau de implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0;
- Analisar e comparar o grau de evolução das empresas avaliadas, a partir de avaliações empíricas;
- Gerar conclusões a respeito dos impactos esperados pela utilização dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, bem como das dificuldades de implementação, fundamentadas na revisão bibliográfica e no estudo empírico.

O principal resultado obtido foi o desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade das capacidades proporcionadas pela Indústria 4.0. Pretende-se que o modelo proposto, que foi validado e testado em empresas relevantes do setor industrial, sirva como uma ferramenta de apoio para a avaliação do grau de maturidade de implementação de projetos relacionados à utilização de novas tecnologias da Indústria 4.0, seja pelo próprio autor em suas atividades profissionais, pela comunidade científica, ou por profissionais e empresas que desejem utilizá-lo.

A relevância e o interesse no modelo podem ser atestados pelo fato de um dos objetivos da Iniciativa 4.0 em Portugal ser o desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade similar a este. Em termos acadêmicos, se o modelo for validado empiricamente adotando uma metodologia quantitativa, poderá ser utilizado para encontrar evidências dos impactos e barreiras na implementação da Indústria 4.0 bem como outros desenvolvimentos teóricos.

### 1.3. Metodologia

Para o estudo do tema da Indústria 4.0, foi realizada uma revisão bibliográfica da literatura recente em livros, jornais e revistas especializados, possibilitados pela pesquisa em bases científicas de conhecimento, tais como a *Web of Science*, *Science Direct* e *Scopus*. Esta revisão da literatura permitiu a observação de diferentes abordagens da Indústria 4.0, como as diferentes definições adotadas por autores de diversos países, os impactos trazidos pelas novas tecnologias aplicadas ao ambiente industrial, as barreiras para a disseminação e adoção dessas tecnologias, além das tendências futuras relacionadas às tecnologias aplicadas aos processos de negócios.

Para a elaboração do modelo de avaliação de maturidade utilizado nas pesquisas junto às empresas, foram estudadas as metodologias e modelos de maturidade existentes na literatura. A partir deste estudo, foram definidas as dimensões da avaliação, que podem ser entendidas como os fatores de agrupamento das capacidades de transformação. As dimensões estão relacionadas aos ambientes externo e interno da organização, e contemplam os possíveis fatores que possam impactar no resultado dos projetos relacionados a Indústria 4.0. As capacidades de transformação, foram avaliados por perguntas objetivas, que foram sintetizadas e analisadas para formar um entendimento a respeito da dimensão em que se inserem. As perguntas conduziram à análise de aspectos específicos de determinados conceitos ou tecnologias, com a finalidade de avaliar o grau de implementação dos mesmos pelas empresas, de acordo com os níveis de maturidade definidos.

A utilização do modelo para guiar a transformação para a Indústria 4.0 deve seguir uma abordagem em fases, que inclua a identificação do nível atual de maturidade nas diversas dimensões, e em suas respectivas capacidades, além do nível de maturidade futuro desejado (objetivo), e também a definição das ações de resposta, que sejam capazes de solucionar os *gaps* identificados entre a situação atual e a desejada no futuro.

### 1.4. Estrutura do trabalho

O segundo capítulo foi dedicado à revisão bibliográfica da Indústria 4.0 e de modelos de maturidade, baseada majoritariamente em artigos de revistas científicas e acadêmicas, além de livros e relatórios técnicos de empresas e associações industriais e de empresas de

consultoria, obtidos a partir de pesquisas nas bases de dados científicas. Foi subdividido em duas partes com objetivos bem definidos. A primeira parte abordou as definições e principais conceitos da Indústria 4.0, as iniciativas empresariais e governamentais realizadas em diversos países, as principais tecnologias e aplicações industriais e os impactos delas para a competitividade das empresas. Apresentou ainda os desafios e barreiras a serem enfrentados por países e empresas para implementarem os conceitos e tecnologias e deles obterem vantagens competitivas, e as tendências de pesquisa e aplicações previstas para os próximos anos. A segunda parte da revisão bibliográfica concentrou-se no estudo de modelos de maturidade existentes na literatura consultada, e numa análise comparativa entre estes modelos.

O terceiro capítulo teve como foco o desenvolvimento do modelo de maturidade da Indústria 4.0, seguindo uma metodologia proposta na literatura, composta por seis etapas sequenciais e iterativas, das quais quatro foram aplicadas neste trabalho. Foi feita a composição do modelo, e também a sua validação e testes piloto junto a empresas industriais.

O quarto capítulo foi destinado a discussões e conclusões baseadas na revisão bibliográfica, e no desenvolvimento e aplicação do modelo de maturidade. Também foram feitos questionamentos e sugestões para futuros trabalhos profissionais e acadêmicos.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Conceitos e definições da Indústria 4.0

Está em andamento um amplo movimento mundial em algumas das economias mais avançadas, em busca de aumento de produtividade, flexibilidade e agilidade na manufatura, através da incorporação dos últimos avanços das tecnologias de informação e comunicação (ICT) e das tecnologias de operação (OT). A adoção dessas tecnologias, e os seus relativos pesos na competitividade da manufatura crescerão nos próximos anos, e surgirão novas soluções e serviços, gerando novas oportunidades de negócio (Posada et al., 2015). Os fatores catalizadores para estas transformações são de natureza social, econômica e mudanças políticas, marcados por (Lasi, Fettke, Kemper, Feld, & Hoffmann, 2014):

- Curtos períodos de desenvolvimento de produtos e serviços – alta capacidade de inovação tem se tornado um fator essencial para muitas empresas se adequarem ao tempo de mercado (*time to market*).
- Individualização da demanda – os consumidores definem as condições das negociações comerciais. Esta tendência leva a uma grande individualização dos produtos, e em alguns casos demandam produtos customizados (lote único).
- Flexibilidade – devido aos novos requisitos de mercado, é necessária uma alta flexibilidade no desenvolvimento de produtos individualizados e na produção dos mesmos.
- Descentralização – para lidar com as condições de mercado e prover respostas ágeis, é necessário um rápido processo de tomada de decisão, culminando em uma hierarquia organizacional reduzida e descentralizada.
- Eficiência dos recursos – a crescente escassez de recursos e consequente aumento de preços de matérias-primas, assim como mudanças nos fatores sociais e ambientais, requerem um maior foco na sustentabilidade no contexto industrial, resultando em aumento de eficiência na utilização dos recursos.

No contexto das transformações acima citadas, está a criação de valor, que é caracterizada por fatores intangíveis como melhorias de processos, inovação, conhecimento e habilidades dos trabalhadores. Tem sido cada vez mais difícil para as empresas de manufatura se manterem competitivas a longo prazo, abordando a criação de valor apenas através de recursos tangíveis. A criação de valor, suportada por tecnologias de informação e comunicação representa um importante fator de competitividade, para analisar e valorar os recursos intangíveis e as melhorias de processos de uma empresa de manufatura (Tonelli, Demartini, Loleo, & Testa, 2016).

Os sistemas de manufatura se tornam mais complexos conforme a necessidade de maior nível de serviço das cadeias de valor. A dualidade de flexibilidade e produtividade é um desafio recorrente para as organizações, que buscam a redução de custos, e uma maior oferta e customização dos produtos. A flexibilidade de sistemas de manufatura pode ser entendida como a habilidade para produzir uma grande variedade de produtos, sendo considerada um dos mais importantes requisitos para as novas aplicações da robótica (Esmaeilian, Behdad, & Wang, 2016).

A inovação no desenvolvimento de produtos requer uma reformulação dos atuais métodos de fabricação e montagem, soluções de tecnologia de informação e modelos organizacionais. O projeto e os conceitos de produtos devem ser revistos e sua adequação deve ser adaptada para um modelo moderno, com uma abordagem interdisciplinar de desenvolvimento de produtos. As indústrias têm se deparado com os desafios da individualização dos produtos, com a necessidade de aumentar a eficiência dos recursos e reduzir o tempo de lançamento de produtos. Estes desafios são usualmente relacionados à digitalização, à utilização das tecnologias de informação e à conectividade de produtos, recursos produtivos e processos, que são potencializados pela internet das coisas (IoT) (Rennung, Luminosu, & Draghici, 2016).

O aumento da necessidade de produtos individualizados pelo mercado, tem alterado a configuração da produção em massa (criação de produtos padronizados) para a configuração da customização em massa (onde os consumidores encontram o que eles realmente desejam) (Scheuermann, Verclas, & Bruegge, 2015). Os dois paradigmas têm o objetivo de serem eficientes em custo em todo o ciclo de produção. Os atuais sistemas de produção enxuta (*Lean Production Systems*), contribuem para reações mais rápidas em mercados de constantes mudanças de demanda, menores lotes de produção e processos padronizados para a produção em massa e em lotes. Mas as variações de demanda, e por vezes as demandas individualizadas, limitam a capacidade dos atuais sistemas de produção em responder adequadamente, uma vez que são concebidos para uma produção nivelada, com tempos de ciclo de produção e sequência bem definidos. Ou seja, as contribuições que eles podem dar à produtividade e à flexibilidade da manufatura, parecem ter chegado ao limite, o que exige novas abordagens complementares e inovadoras, para atender às necessidades de lotes individuais e de curtos ciclos de vida dos produtos (Kolberg & Zühlke, 2015).

A nível de automação, as tecnologias, como o controle numérico computadorizado (CNC), os controladores lógicos programáveis (PLC), são usados em substituição da mão de obra e para otimizar a eficiência produtiva. A nível de integração, a internet das coisas e serviços (IoTS) e os sistemas ciber-físicos (CPS) serão amplamente aplicados na manufatura, baseados nas tecnologias a nível de controle, gerando um ambiente de manufatura digital e redes de comunicação, onde eles não somente irão conectar os componentes, mas também construir a comunicação entre os sistemas de controle. Os dados serão coletados por sensores, máquinas, linhas de produção, ou sistemas de gestão e controle de manufatura, e também fora do ambiente fabril, como por exemplo por respostas dos consumidores e dos componentes logísticos da cadeia de valor. Neste nível, informações mais valiosas são descobertas, o que ajuda os profissionais e equipamentos a melhorarem o nível de resposta da manufatura. A nível de inteligência, a manufatura usará dados ou informações obtidas no nível de integração para criar o planejamento e tomar decisões através de tecnologias inteligentes, como os sistemas avançados de mineração de dados (*Data Mining*), propiciando a análise de grandes volumes de dados (*Big Data Analysis*). Adicionalmente, os sistemas inteligentes de manufatura podem ser dotados de autoconsciência, auto-otimização, autoconfiguração, que possibilitam a descentralização das decisões das máquinas. As aplicações a este nível tendem a ser as implementações da manufatura avançada, também denominada na literatura por Indústria 4.0 (Qin, Liu, & Grosvenor, 2016).

A presença na manufatura de uma abordagem sistemática para trazer inteligência para o chão de fábrica, é um requisito para prover às fábricas uma produção contínua e com paradas não programadas próximas a zero. A integração de sistemas ciber-físicos na produção, na logística e nos serviços, pode trazer às organizações a autoconsciência, a autoadaptação das máquinas e informações compreensíveis, para ajustar os parâmetros de produção de forma inteligente. Estas características podem transformar as atuais fábricas em uma fábrica 4.0, com potenciais econômicos significativos. A Indústria 4.0 é potenciada pelas enormes mudanças na sociedade atual, devido à invenção e utilização frequente de redes sociais em combinação com dispositivos inteligentes (Bagheri, Yang, Kao, & Lee, 2015; Schuh, Reuter, Hauptvogel, & Dölle, 2015).

Em um mundo inteligentemente conectado, a internet das coisas e serviços (IoTS) estará presente em todas as principais áreas de negócios, como manufatura e logística industrial, geração e distribuição de energia, mobilidade e transportes, construção civil, no setor de saúde, entre outros. Nas fábricas inteligentes do futuro, seres humanos, máquinas e demais recursos produtivos se comunicarão uns com os outros tão naturalmente como em uma rede social. Produtos inteligentes conhecerão os detalhes de como eles terão sido produzidos e quais serão as intenções de uso pelos consumidores. Assim, eles trocarão informações com a manufatura e darão suporte para a melhoria dos processos, respondendo eles mesmos a questões como: o local em que foram produzidos e as etapas realizadas (rastreadibilidade), quais parâmetros deveriam ser usados para serem processados (qualidade face às especificações do cliente), para onde deve ser distribuído (logística inteligente), entre outras questões. Essa interface dos produtos com sistemas inteligentes de mobilidade, logística inteligente, construções inteligentes, e sistemas de energia inteligentes, farão as fábricas inteligentes uma componente importante das infraestruturas inteligentes do futuro, resultando numa transformação das cadeias de abastecimento tradicionais e no surgimento de novos modelos de negócios. Consequentemente, a Indústria 4.0 deve ser implementada em um ambiente interdisciplinar e colaborativo, integrando engenheiros, especialistas de tecnologias de informação e comunicação, psicólogos, ergonomistas, profissionais do *marketing*, cientistas sociais, médicos, *designers*, entre outros profissionais de áreas do conhecimento complementares à Engenharia (Kagermann et al., 2013).

Porter & Heppelmann (2015) analisam como a natureza de produtos conectados podem modificar significativamente todas as funções de empresas de manufatura e a intensidade e coordenação como estão sendo redefinidas. Os autores fazem uma análise sobre a evolução dos produtos e dos processos produtivos e logísticos, enfatizando as novas possibilidades e funcionalidades de monitoramento, controle, segurança, otimização e autonomia, introduzidas pelas tecnologias de comunicação e sistemas embarcados em produtos e equipamentos. O ponto central desta evolução dos produtos e processos, e das transformações das cadeias de valor, são os dados, desde as tecnologias de aquisição, passando pelas tecnologias de processamento e armazenamento, e terminando com as tecnologias de apresentação e resposta das análises realizadas (descritivas, prescritivas, de diagnóstico, e preditivas). Os autores abordam as principais funções empresariais no âmbito da Indústria 4.0:

- Desenvolvimento de produtos: baixo custo da variabilidade, projeto que permite atualizações e melhorias contínuas nos produtos através de tecnologias embarcadas,

monitoramento da qualidade dos produtos durante a fase de uso, serviços adicionados aos produtos através da conectividade, sistemas embarcados e instrumentação, suporte para novos modelos de negócios, interoperabilidade de sistemas;

- Manufatura: fábricas inteligentes, simplificação de componentes através de softwares, reconfiguração de processos de montagem com intensificação da customização de produtos, operações contínuas ao longo do ciclo de vida dos produtos;
- Logística: rastreabilidade, monitoramento remoto, gerenciamento de frotas em tempo real, roteirização otimizada, veículos autônomos;
- Marketing e vendas: transição da configuração de apenas uma venda para o contato contínuo com o cliente, novas possibilidades de segmentação e customização, novas formas de relacionamento com os consumidores, novos modelos de negócio, foco em sistemas produto-serviço e não apenas em produtos discretos;
- Serviços pós-venda: transição de um modelo reativo de oferta de serviços para um modelo preventivo, proativo e remoto, antecipação da necessidade de peças de reposição e identificação das causas de falhas nos produtos, serviços de assistência remota, análise preditiva do desempenho e prevenção de falhas, serviços suportados por realidade aumentada, novos serviços suportados pela análise dos dados e pela conectividade.

A Tabela 1 apresenta algumas definições e conceitos relacionados à Indústria 4.0 na visão de alguns autores consultados:

*Tabela 1 – Definições e conceitos da Indústria 4.0*

AUTOR	DEFINIÇÃO
Wang, Wan, Li, & Zhang, 2016	A Indústria 4.0 incorpora avanços técnicos emergentes para melhorar o desempenho industrial, e para lidar com os desafios globais. O conceito de Indústria 4.0 é visto como uma estratégia importante para as organizações se manterem competitivas no futuro, e inclui o projeto e a implementação de produtos e serviços competitivos, assim como a gestão eficaz dos sistemas de produção e logística.
Xu, He, & Li, 2014	A Indústria 4.0 é uma terminologia que faz referência ao termo “Internet das coisas” (IoT), voltada para aplicações industriais. A IoT pode ser entendida como uma infraestrutura global de comunicação com capacidades autoconfiguráveis, baseadas na padronização e interoperabilidade de protocolos de comunicação, onde “coisas” físicas e virtuais possuem identificação, atributos e usam interfaces inteligentes, estando integradas na rede de comunicação.
Stock & Seliger, 2016; S. Wang et al., 2016	A Indústria 4.0 é descrita como a produção orientada por sistemas ciber-físicos que integram recursos de produção, sistemas de armazenamento, logística, além de necessidades sociais, para estabelecer cadeias globais de criação de valor.



AUTOR	DEFINIÇÃO
Schumacher, Erol, & Sihm, 2016	A Indústria 4.0 é caracterizada pelos recentes avanços tecnológicos, onde a internet e as tecnologias de suporte, possibilitam a integração de objetos físicos, agentes humanos, máquinas inteligentes, linhas de produção e processos, além das fronteiras das organizações, para formar uma nova forma de cadeia de valor, inteligente, integrada e ágil.
Schuh, Anderl, Gausemeier, ten Hompel, & Wahlster, 2017	A quarta revolução industrial precisa ser entendida como algo que vai além da digitalização da produção e da automação de processos, mas como algo que tem potencial para revolucionar a maneira como os negócios funcionam. Ela tem potencial de afetar a forma como os produtos e serviços são idealizados e projetados, como são fabricados, como são vendidos, e em última forma como eles concorrem entre si.
Schuh et al., 2017	A Indústria 4.0 é uma comunicação multilateral, em tempo real, com alto volume de dados, e com interconexão entre sistemas ciber-físicos e as pessoas. O principal potencial econômico da Indústria 4.0 reside na sua habilidade para acelerar os processos de adaptação e de tomada de decisão. Isso se aplica tanto para o processo de aumento de eficiência na Engenharia, na manufatura, nos serviços e nas vendas, quanto para o foco nas mudanças do modelo de negócio como um todo.
Kusiak, 2017	A manufatura inteligente integra os ativos da manufatura com sensores, sistemas de computação, tecnologias de comunicação, modelagem de dados, controle, simulação e sistemas preditivos. Ela utiliza os conceitos de sistemas ciber-físicos, a internet das coisas, computação em nuvem, computação orientada a serviços, inteligência artificial, e ciência de dados. Uma vez implementados, esses conceitos e tecnologias de transição farão da manufatura a marca da nova revolução industrial. O autor define seis pilares para a consolidação da manufatura inteligente: tecnologias e processos de manufatura, materiais, dados, engenharia preditiva, sustentabilidade, e compartilhamento de recursos e redes de comunicação.
Wang et al., 2016	A Indústria 4.0 tem como finalidade mudar a indústria tradicional para um sistema de manufatura reconfigurável, e implementar a fábrica inteligente. Isso é essencial para suportar a produção de lotes pequenos e atender à demanda customizada dos consumidores.
Albers, Gladysz, Pinner, Butenko, & Stürmlinger, 2016	Denota uma produção inteligente, conectada e descentralizada. O aspecto principal é a comunicação contínua entre os humanos, as máquinas e produtos durante o processo produtivo, possibilitados por sistemas ciber-físicos. O objetivo geral é aumentar a eficiência de custo e tempo, e melhorar a qualidade dos produtos, o que requer um entendimento ampliado das tecnologias que possibilitam esses ganhos, assim como os métodos e as ferramentas para obtê-los.

O entendimento da evolução da indústria tradicional para a Indústria 4.0, deve contemplar os seguintes aspectos principais (Posada et al., 2015; Schuh, Potente, Wesch-Potente, Weber, & Prote, 2014):

- A tecnologia de informação possibilita a customização em massa de produtos manufaturados, nos quais a produção precisa ser adaptada para lotes pequenos ou eventualmente em lotes individuais;
- Adaptação flexível e automática da cadeia de produção às constantes mudanças dos requisitos dos consumidores;
- Rastreabilidade e autoconhecimento de componentes e produtos, e a comunicação destes com as máquinas e outros produtos;
- Aumento da interação homem-máquina, incluindo a coexistência com robôs autônomos, além de novos e radicais meios de interação e operação nas fábricas;
- Otimização da produção devido à internet das coisas possibilitou a comunicação em fábricas inteligentes;
- Novos tipos de serviços e modelos de negócio têm contribuído para novos meios de interação e colaboração na cadeia de valor.
- Fonte centralizada de informações: esta é a contribuição possibilitada pelo desenvolvimento de softwares. Precisa ser implementada durante todo o ciclo de vida dos produtos, evitando ambiguidades e assegurando que todas as mudanças do produto e do processo produtivo sejam visíveis para as equipes envolvidas.
- Automação: marcada pelo avanço da performance de sistemas autônomos e descentralizados, que colaboram através de redes de informação.

Os aspectos relacionados acima, são exemplos das contribuições que as novas tecnologias podem trazer para o ambiente industrial. Na Alemanha, um comitê multissetorial formado por instituições de ensino, pesquisa, inovação, e empresas de engenharia e tecnologia, denominado *Plattform Industrie 4.0*, reconhecido na literatura consultada como uma das principais iniciativas de promoção da Indústria 4.0, caracteriza em seu relatório final de recomendações para a implementação da Indústria 4.0, a visão de futuro da Indústria 4.0 (Kagermann et al., 2013):

- Novo nível de interação sociotécnica envolvendo diversos recursos produtivos, como equipamentos de produção, robôs, sistemas de transporte e movimentação de cargas, sistemas de armazenagem), que serão autônomos, capazes de controlarem-se em resposta a diferentes situações, autoconfiguráveis, baseados em conhecimento, sensorizados, e que serão incorporados pelos sistemas de planejamento e gestão.
- Os produtos inteligentes serão unicamente identificados e conhecerão os detalhes de como terão sido fabricados, o que significa que poderão eles mesmos controlar os estágios de sua fabricação de forma semiautônoma. Mais do que isso, produtos acabados conhecerão os parâmetros ótimos de funcionamento e serão capazes de reconhecer sinais de desgaste e má utilização e alertar seus usuários, ou mesmo comunicarem-se com os fabricantes para que estes ofereçam serviços de manutenção, assistência técnica e reposição.
- Será possível a incorporação de necessidades individuais dos consumidores durante os processos de projeto, configuração, ordens de compra, planejamento, produção, operação e reciclagem. Com isso, será possível incorporar demandas no último momento (*last minutes*

*changes*) e realizar as mudanças necessárias nos processos, o que exigirá lotes cada vez menores, e em alguns casos individuais, e ainda assim serem lucrativos.

- A implementação da Indústria 4.0 possibilitará aos trabalhadores controlarem, regularem e configurarem as redes de recursos inteligentes de manufatura, baseados em computação sensível ao contexto. Os trabalhadores estarão mais liberados de funções rotineiras e poderão focar em atividades criativas e que adicionam valor. Ao mesmo tempo, condições flexíveis de trabalho possibilitarão mais compatibilidade entre a vida profissional e pessoal.

- Novos modelos de negócios serão requeridos para suportar os cenários de uma manufatura integrada, da logística adaptativa e auto-organizável, e da engenharia integrada ao cliente. Esses novos modelos de negócios tendem a ser mais uma rede integrada de empresas atuando de forma dinâmica do que somente uma empresa.

Como consequência dos fatores acima citados, os negócios e as cadeias de valor nas quais estão inseridos, serão muito mais dinâmicos e mais expostos a mudanças no modelo de negócios. Como exemplo está a evolução da impressão 3D e novos materiais a serem utilizados, que podem reduzir drasticamente as cadeias tradicionais de abastecimento. Fornecedores de materiais como polímeros e seus subprodutos, ou a cadeia metalmecânica poderão ser fortemente impactados, uma vez que os próprios consumidores terão a capacidade de projetar e fabricar produtos em suas próprias casas, eliminando dessas cadeias as empresas responsáveis pelo projeto, fabricação e transporte dos mesmos. Desta forma, será cada vez mais requerido das empresas, que elas possuam conhecimento e metodologias capazes de direcionar as ações necessárias para se manterem competitivas em seus respectivos nichos de atuação.

Para Schuh et al. (2017), o desenvolvimento da Indústria 4.0 será diferente em cada empresa. É necessário então que as empresas comecem pela análise da situação atual e dos seus objetivos estratégicos, considerando horizontes de médio e longo prazos, de quais tecnologias e sistemas estão efetivamente implementados. Quanto mais rápido uma empresa se adaptar e se antecipar a um evento que cause mudança no negócio, maiores serão os benefícios dessa adaptação. Quando um evento de relevância ocorre, existe uma defasagem entre este e a percepção deste evento por parte das empresas, e consequentemente da tomada de decisões e efetivação das medidas de resposta, como ilustra a Figura 1. Um evento pode ser de curto prazo, por exemplo uma parada de linha de produção, uma avaria em um produto ou em um equipamento, ou pode ser de médio prazo, por exemplo uma mudança nos requisitos de um produto, com as consequentes modificações no projeto ou no processo produtivo, ou ainda no processo de compra do produto.

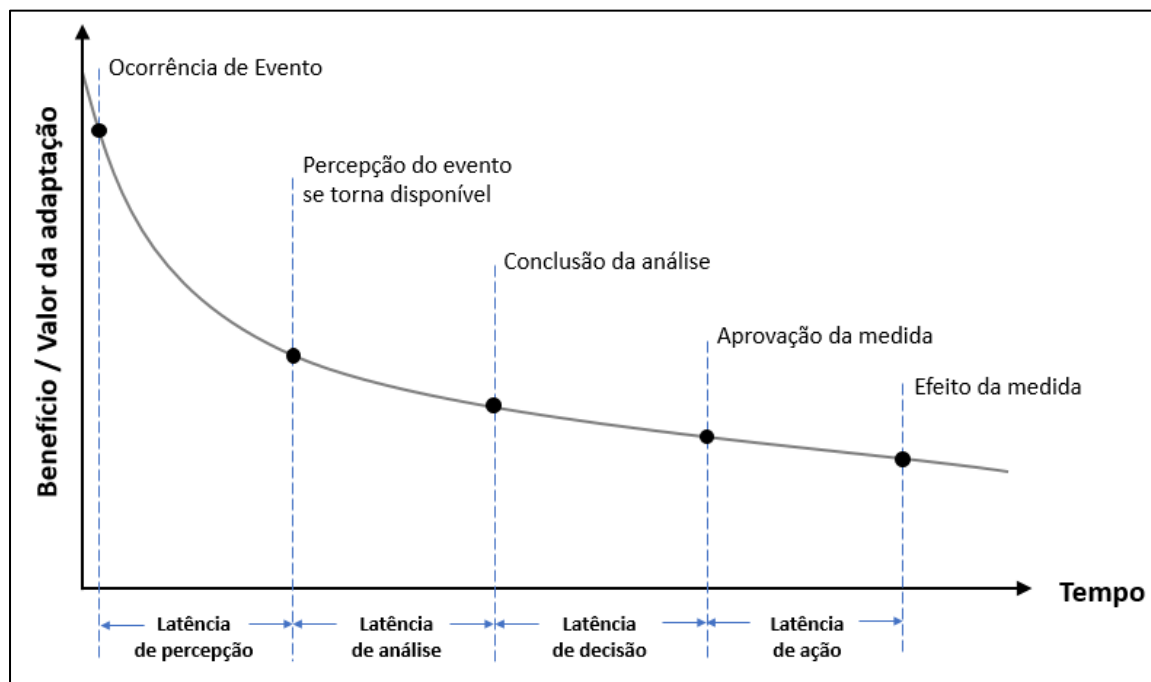


Figura 1 - Processo de adaptação corporativo - adaptado de Schuh et al. (2017)

Uma das razões é que os sistemas de informação não são suficientemente integrados para permitir o processamento das informações de ponta a ponta na organização, desde a aquisição de dados até sua análise e realização das ações de resposta. As capacidades adicionadas pela Indústria 4.0, ajudam as empresas a reduzir drasticamente o tempo entre a ocorrência de um evento e a implementação de uma resposta apropriada. Na prática, por exemplo, mudanças nos requisitos dos consumidores, adquiridas no campo, podem ser incorporadas mesmo durante o processo de manufatura de um produto, porque a empresa possui agilidade para se adaptar ao novo contexto. Como resultado, o consumidor terá exatamente o produto que deseja em um tempo significativamente mais curto (*time to market*) e com maior qualidade (Schuh et al., 2017).

As fábricas inteligentes (*smart factories*) serão apenas um dos muitos componentes inteligentes dos negócios do futuro. Além delas, os processos inteligentes, os produtos e serviços inteligentes, integrarão um ambiente industrial conectado, flexível, ágil e responsivo às mudanças de contexto. E para além das fronteiras das indústrias, as construções inteligentes, as redes elétricas inteligentes, as infraestruturas inteligentes, e os sistemas de transporte inteligentes formarão as cidades inteligentes do futuro.

As definições e descrições da bibliografia consultada, permitem inferir que a manufatura avançada, ou Indústria 4.0, suportada pelas tecnologias emergentes e novos conceitos de gestão, trarão ganhos de produtividade, qualidade e redução de custos e prazos, aumentando a eficiência na utilização dos recursos e maximizando os resultados das empresas. A demanda dos consumidores por produtos e serviços customizados e inovadores, traz como consequência a redução dos prazos ao longo de toda a cadeia de valor, desde a concepção, passando pelo projeto e fabricação, até a entrega dos produtos e serviços. As tecnologias da Indústria 4.0, têm potencial de interferir significativamente em todos os processos de negócio, estreitando a relação com os consumidores e propiciando novos modelos de negócio.

## 2.2. Tecnologias habilitadoras e aplicações industriais

Quando se trata do conceito da Indústria 4.0, existem diversos conceitos e tecnologias habilitadoras (*key enabling technologies*) envolvidos nesta tendência global, tais como: sistemas ciber-físicos (CPS), a internet das coisas e de serviços (IoTS), comunicação entre máquinas (M2M), automação industrial, equipamentos autônomos e inteligentes, dispositivos móveis inteligentes, *Big Data* industrial, digitalização dos produtos e processos, tecnologias de computação visual (como realidade virtual e aumentada, processamento de imagens 3D, interfaces de interação homem-máquina), computação em nuvem, manufatura aditiva, introdução de inteligência artificial (Kagermann et al., 2013; Rüßmann et al., 2015; Porter & Heppelmann, 2015). A união destas tecnologias traz novas possibilidades para as organizações, e em conjunto com novos modelos de negócio e o aumento das trocas comerciais, tendem a gerar um grande aumento da produção industrial. Com microprocessadores potentes e tecnologias de inteligência artificial, os produtos e as máquinas tornam-se inteligentes no sentido de não possuírem apenas capacidades de computação, comunicação e controle, mas também de autonomia e socialização (Wang et al., 2016).

Considerando que o custo das tecnologias decresce exponencialmente (Lei de Moore), devido ao aumento do volume de produção diluir os custos fixos e de desenvolvimento, e do próprio barateamento dos materiais, processos e logística utilizados, é esperado que as diversas tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 sejam disseminadas globalmente em um ritmo muito rápido, e que o aumento de escala de demanda e de produção seja o motor das transformações que estão por vir.

Para melhor compreensão das transformações possíveis e esperadas para o desenvolvimento da Indústria 4.0, é importante o entendimento das características observáveis nas tecnologias (*design principles*), pois elas são a base para o desenvolvimento de produtos e serviços, e podem auxiliar no entendimento dos benefícios destas tecnologias para aplicações industriais. Sob a perspectiva acadêmica, os *design principles* são a fundação da teoria de projetos. Os atributos relacionados às tecnologias da Indústria 4.0 buscam a sistematização do conhecimento, e estão intrinsecamente ligados aos CPS e à internet das coisas, resumindo-se em: digitalização, conectividade, interoperabilidade, adaptabilidade, escalabilidade, eficiência, capacidade preditiva, reconfigurabilidade, entre outros (Gunes et al., 2014; Hermann et al., 2016).

São detalhadas abaixo algumas das principais características das tecnologias da Indústria 4.0:

- **Digitalização:** a digitalização de equipamentos e de produtos são a base para a comunicação, operação e controle remotos dos principais processos de negócio, incluindo o desenvolvimento de produtos e serviços, a fabricação, e a distribuição aos clientes. Provê a base para a aquisição de dados em tempo real e de forma remota.
- **Conectividade:** a comunicação em redes sem fio e a troca de informações via internet, desempenharão um papel fundamental para a conexão de pessoas, máquinas, dispositivos móveis, sensores, produtos. Esta colaboração poderá ser de três formas: homem-homem, homem-máquina e máquina-máquina.

- **Interoperabilidade:** refere-se à capacidade de sistemas de informação trabalharem de forma conjunta (interoperarem), trocando informações e as usando para realizar ações específicas. Apesar de tratarem-se de sistemas heterogêneos, que realizam funções diferentes, a troca de dados deve ocorrer de forma íntegra e segura. Estes sistemas podem pertencer a uma mesma organização, ou a múltiplas organizações, o que torna a padronização de trocas de dados fundamental para o sucesso da comunicação.

- **Adaptabilidade:** está relacionada à capacidade de um sistema alterar seu estado, ajustando sua própria configuração em resposta à eventos de mudanças de contexto. É uma das principais características de sistemas que trabalharão com grandes volumes de dados (*Big Data*) em tempo real, e estará presente em sistemas descentralizados e inteligentes.

- **Escalabilidade:** refere-se à capacidade de um sistema manter-se em funcionamento e dando as respostas esperadas, mesmo em situações de aumento do volume de trabalho. O aumento do volume de saídas deve ser proporcional ao aumento de recursos adicionados ao sistema. Esta característica engloba uma outra característica, que é a flexibilidade do sistema em atender variações de variedade e volume de demanda.

- **Eficiência:** possui relação com a quantidade de recursos requeridos por um sistema para entregar determinadas funcionalidades. Um sistema altamente eficiente deveria operar adequadamente com quantidades ótimas de recursos do sistema, ou seja, com pouco ou nenhum desperdício ou ociosidade de recursos. O aumento da comunicação entre os sistemas e a introdução de inteligência, tendem a tornar os sistemas mais eficientes e responsivos.

- **Capacidade preditiva:** refere-se à capacidade de um sistema, baseado em dados históricos, dados em tempo real, e algoritmos de compreensão de padrões, de antever seu estado, comportamento, ou funcionalidade, para um determinado horizonte de tempo futuro, qualitativamente ou quantitativamente. Esta característica suporta outras importantes características ligadas a sistemas autônomos e inteligentes.

- **Reconfigurabilidade:** refere-se à capacidade de um sistema em mudar sua configuração em caso de falhas ou em função de requisições internas ou externas a ele. Um sistema altamente reconfigurável deve ser autoconfigurável, assim como seus componentes. Os sistemas podem ser desde produtos e equipamentos individualmente, até linhas de produção inteiras. Esta é uma característica relacionada no estado da arte da Indústria 4.0, e possui constitui-se numa ampla oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de soluções industriais.

Nas próximas seções são apresentadas algumas das principais tecnologias aplicáveis aos ambientes industriais, relacionadas com a Indústria 4.0.

### 2.2.1. Sistemas ciber-físicos

Em um moderno sistema de manufatura, conexões inteligentes são realizadas por sistemas ciber-físicos (CPS - *Cyber-Physical Systems*), de maneira descentralizada e organizada. Os CPS são constituídos por componentes mecatrônicos, com sensores para a aquisição de dados e com mecanismos atuadores, que influenciam os processos físicos (Stock & Seliger, 2016). Estão inteligentemente ligados uns aos outros e interagem continuamente, através da troca de dados nas redes virtuais e em tempo real. Lee, Bagheri, & Kao (2015) definem os sistemas ciber-físicos como tecnologias transformadoras para gerenciar sistemas

interconectados entre ativos físicos a capacidades computacionais. Gunes et al. (2014) resumem os CPS como complexos sistemas multidisciplinares, que integram tecnologias computacionais embarcadas (parte cibernética) nos componentes físicos, e esta integração inclui observação, comunicação e controle dos sistemas físicos a partir de uma perspectiva multidisciplinar.

A transformação das atuais fábricas para as futuras fábricas 4.0, inteligentes e auto-organizáveis, demandará profundas adaptações nas estruturas de produção e logística, com especial foco nos CPS, pois eles são a tecnologia mais consolidada para aplicações industriais e a base para a obtenção de sistemas automatizados e inteligentes. Eles suportam as tecnologias aplicadas, a integração entre máquinas, a inteligência artificial, as tecnologias de operação remota, e as tecnologias de aprendizagem adaptativa.

Os CPS são altamente transversais, e por isso, cobrem muitos segmentos de mercado além da manufatura, como os transportes, serviços de saúde, agricultura, energia, defesa, indústria aeroespacial, petroquímica, construção, o setor público, entre outros setores da economia (Scheuermann et al., 2015). Os estudos de diversas abordagens da manufatura inteligente sugerem uma forte correlação entre a consolidação dos CPS e demais tecnologias como a IoT, a computação em nuvem e o *Big Data* (Kang et al., 2016).

A comunicação máquina-máquina (M2M - *Machine-to-Machine*), é um importante conceito relacionado com os CPS, e refere-se por exemplo a dispositivos inteligentes, como computadores, equipamentos com *software* embarcado, sensores e atuadores inteligentes, e dispositivos móveis, que se comunicam através de uma rede. M2M e a internet das coisas possibilitam novos modelos de negócios, e objetivam a integração de dados ao oferecerem serviços inteligentes aos consumidores para aumentar a eficiência e prover automação, e sistemas de baixo custo no âmbito do comércio eletrônico. A perspectiva dos CPS nessa revolução industrial irá aumentar a segurança, a produtividade, e a eficiência, ao conectar tecnologias de produção com sistemas embarcados, para sustentar fluxos de produção altamente flexíveis, além de novas formas de colaboração (Gunes et al., 2014).

A principal diferença entre os CPS e os sistemas de controle eletromecânicos ou de um sistema embarcado, é o uso da comunicação, que adiciona possibilidades de reconfiguração e alterações de escala, assim como adiciona complexidade e também uma potencial instabilidade. Os atuais CPS são evoluções das aplicações de diversos setores como a aviação, com os controladores de voo adaptáveis ao contexto, sistemas de navegação interativos, sistemas autônomos de veículos, sistemas de controle e proteção de distribuição de energia, no setor da saúde, no entretenimento, e os aplicados a diversos outros produtos. São estes sistemas embarcados de inteligência e comunicação que serão utilizados nas fábricas do futuro (Poovendran, 2010).

As aplicações dos CPS são os principais fundamentos da implementação da Indústria 4.0, que podem ser sumarizados em dois conceitos: interoperabilidade e consciência, e que incluem muitos outros conceitos secundários. A ideia principal da interoperabilidade é a integração, que é o ponto chave da internet das coisas e dos CPS. A integração pode ser dividida em três componentes: horizontal na cadeia de valor, vertical na organização, e ao longo do ciclo de vida dos processos de Engenharia, e consiste na digitalização, comunicação, padronização, flexibilidade, respostas em tempo real, e customização. A consciência é também um requisito da Indústria 4.0, à medida que esta requer sistemas inteligentes de manufatura, que revelam o

conhecimento, tomam as decisões e realizam as ações de forma independente e inteligente. Contempla a manutenção preditiva, tomadas de decisão, apresentação de inteligência, autoconsciência, auto-otimização e autoconfiguração (Kagermann et al., 2013).

### **2.2.2. Internet das coisas e serviços**

A cada dia é mais fácil observar a convergência entre o mundo virtual e o mundo físico. Produtos e equipamentos com *softwares* embarcados têm sido desenvolvidos e comercializados em praticamente todas as áreas de negócio. Essa combinação proporcionada pelos CPS é a base para que os equipamentos e produtos sejam interligados pela internet ou redes próprias, e possam comunicar uns com os outros, com seus fabricantes, com os consumidores e com plataformas de serviços associados. A esse conceito, denomina-se internet das coisas e serviços (IoTS – *Internet of things and services*). A IoTS estará não somente nas indústrias, mas também nas cidades, nas edificações, nos transportes, nas redes de energia elétrica, nas empresas de serviços e na área de saúde, na agricultura e nos serviços públicos. É possibilitada pelo barateamento de sensores, de *hardwares* de processamento, armazenamento e transmissão de dados, e de dispositivos móveis inteligentes, que se tornarão cada vez mais presentes. Al-Fuqaha, Guizani, Mohammadi, Aledhari, & Ayyash, (2015) citam 6 elementos principais necessários para entregar as funcionalidades da IoTS: identificação, sensoriamento, comunicação, computação, serviços, e interoperabilidade semântica.

Tratando-se da aplicação da internet das coisas na manufatura (IIoT - *Industrial Internet of Things*), ela possibilita a existência de operações inteligentes, contemplando a troca de informações em tempo real entre os sistemas de produção e os operadores. Com isso, é possível obter ganhos de qualidade e produtividade, provendo robustez, autonomia, auto-organização, automanutenção, transparência, previsibilidade, eficiência, interoperabilidade, rastreabilidade, que são alguns dos benefícios da Indústria 4.0 (Monostori, 2014).

É tratada como uma tecnologia habilitadora, pois da mesma forma que os CPS, ela suporta as aplicações de redes industriais e também ao longo da cadeia de valor. Por ser uma tecnologia transversal a diversos setores, possibilita a comunicação entre diferentes empresas, ou diferentes grupos de trabalho, que podem trabalhar em paralelo para solucionar um mesmo problema. Desta forma, ela é uma tecnologia facilitadora para as atividades de Engenharia simultânea, possibilitando a interação das equipes de Engenharia e projeto diretamente com os clientes, através de plataformas de comunicação, ou mesmo de *softwares* embarcados nos produtos. É possível por exemplo recolher informações sobre as preferências e modos de uso dos produtos, desgaste de componentes, e consumo de materiais. De forma inteligente, os próprios produtos poderão comunicar com seus fabricantes e alertar sobre manutenção, reposição de peças, uso inadequado, riscos de segurança do produto ou do consumidor, entre outras possibilidades que aproximam as partes envolvidas na comercialização de produtos e serviços.

### **2.2.3. Arquitetura orientada a serviços e computação em nuvem**

A computação em nuvem (*cloud computing*) já é amplamente utilizada por empresas de serviços e por grandes corporações industriais. Foi possibilitada pela crescente capacidade de armazenagem de dados e pela evolução das tecnologias de transmissão de dados, com a



evolução da infraestrutura para internet e redes, e pela redução dos custos associados ao aumento da escala. O modelo de computação em nuvem possibilita o acesso em rede a uma central de recursos, o uso otimizado e controle dos recursos, menores esforços de gerenciamento de recursos de *hardware* e *software*, maiores capacidades de computação, e serviços sob demanda, sem a interação humana, com provedores de serviços (Gunes et al., 2014).

Seus maiores benefícios são a possibilidade de atividades simultâneas e compartilhadas em uma empresa (engenharia, *marketing*, vendas, logística e administração) ou mesmo entre empresas, o que facilita o trabalho remoto. Outros benefícios são a disponibilidade de informações a partir de uma base única, a proteção dos dados e maiores possibilidades de controle de acesso aos mesmos. A manufatura baseada na nuvem (*cloud-based manufacturing*) é um paradigma que contribuirá de maneira significativa para a consolidação da Indústria 4.0. É definida com um modelo de manufatura em rede que explora o acesso sob demanda a um conjunto de informações compartilhadas de diversos recursos de manufatura, para formar linhas de produção temporárias e reconfiguráveis, que aumentam a eficiência, reduzem os custos dos produtos e contribuem para a otimização da alocação de recursos em resposta a variações da demanda. As principais características da manufatura baseada na nuvem são a agilidade, escalabilidade, acesso descentralizado, e a virtualização (Thames & Schaefer, 2016).

Uma tendência futura da computação em nuvem para as organizações industriais, é a existência de diversas estações de trabalho sem unidades de processamento e armazenagem, uma vez que essas atividades podem ser realizadas de forma centralizada na nuvem. Isso diminui a complexidade de equipamentos nas linhas de produção, tornando o fluxo de informações mais robusto e controlado, com menos espaço físico necessário, melhorando o *layout* e fluxo de materiais.

Em ambientes industriais, a combinação da utilização de redes descentralizadas e otimizadas de servidores provedores de aplicações de serviços e da computação em nuvem (*thin clients*), viabilizam uma estratégia ágil de operação, que permite às organizações funcionarem como redes virtuais de manufatura e manufatura em nuvem, para responderem às mudanças nas preferências dos consumidores e aumentarem a variedade de produtos ofertados (Song & Moon, 2017).

Associada à computação em nuvem, está o conceito da arquitetura orientada a serviços (*Service oriented architecture* – SoA), relacionado à integração de aparelhos ou sistemas heterogêneos, e pode ser aplicado para suportar a internet das coisas. Denota a integração dos processos de negócio através das tecnologias de informação, trazendo à empresa uma visão holística dos processos internos como serviços, e estes desmembrados em entradas, processamento e saídas, para atendimento das demandas das diversas áreas corporativas e principalmente do cliente usuário do produto ou do serviço. O conceito de SoA tem sido utilizado com sucesso em diferentes áreas de pesquisa, como computação em nuvem, redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network* - WSN) para monitoramento de processos, e redes veiculares. Xu et al. (2014) e Zhou, Liu, & Liang (2016) propõem uma arquitetura de serviços, dividida em quatro camadas, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Multicamadas de arquitetura orientada a serviços (SoA) – adaptado de Xu et al. (2014)

CAMADAS	DESCRIÇÃO
<b>Camada de sensorização</b>	Esta camada é integrada com equipamentos (RFID, sensores, atuadores), para aquisição de dados e controle dos equipamentos
<b>Camada de redes de comunicação</b>	Esta camada provê suporte de redes de comunicação e transferência de dados com ou sem fio
<b>Camada de serviços</b>	Esta camada cria e gerencia os serviços para satisfazer as necessidades dos usuários
<b>Camada de interface</b>	Esta camada provê métodos de integração entre os usuários e as aplicações de serviços

Novos serviços têm sido ofertados e ameaçam os negócios de empresas tradicionais que só atuam localmente, principalmente nos setores de tecnologia de informação e comunicações, pois elas passam a concorrer com empresas localizadas em outros países, com maiores vantagens competitivas. A servitização dos negócios, aliada à computação em nuvem, com os modelos de infraestrutura como serviço, plataformas como serviço, *hardware* como serviço, *software* como serviço, têm gerado novos modelos de negócio, com valiosas fontes de receita. Exemplos são serviços de *data center* e escritórios de *call center*, localizados em países com menores custos operacionais. Outros exemplos são *softwares* de gestão de negócios (*enterprise resources planning - ERP*) e alguns *softwares* de aplicações, que possuem versões baseadas na nuvem, e alguns deles já funcionam somente nestas versões.

#### 2.2.4. Big Data Analytics

Devido aos recentes desenvolvimentos que resultaram em maior disponibilidade e barateamento de sensores, sistemas de aquisição de dados, e redes de computadores, a atual competitividade força mais empresas a se moverem no sentido de implementarem metodologias de produção e comunicação com uso de tecnologias avançadas. Consequentemente, o crescente uso de sensores e equipamentos conectados tem gerado um grande volume de dados, o que é conhecido como *Big Data*. O valor da aquisição de dados e sua respectiva análise dependem do quanto esses dados proporcionam de informações de suporte à decisão (Lee et al., 2015) e (Esmaeilian et al., 2016).

O *Big Data* é compreendido como uma base de dados inapropriada para ser usada com os métodos tradicionais de processamento de dados, devido a sua enorme abrangência, à estrutura complexa de organização destes dados e ao tamanho da base. Desta forma, técnicas e sistemas especiais, novas metodologias de análise, aquisição, preparação, pesquisa, compartilhamento, armazenagem, transferência, visualização, e privacidade dos dados, têm sido requeridas para a realização de análises preditivas, extração de valor dos dados (Kang et al., 2016). Essas metodologias são utilizadas pelas diversas áreas de negócios para aumento de produtividade, redução de custos, manutenção preditiva, bem como captação e fidelização de clientes, entre outras aplicações industriais e de serviços.

Pesquisas em mineração de dados (*Data Mining*), técnicas de descoberta de conhecimento em bancos de dados (*Knowledge Discovery in Databases* – KDD), e técnicas de inteligência de negócios (*Business Intelligence*) têm evoluído rapidamente nos últimos anos, e muitos algoritmos de extração de conhecimento têm sido propostos, especialmente por pesquisadores não Engenheiros. Estes algoritmos cobrem uma ampla gama de disciplinas, como técnicas de aprendizagem de máquinas, métodos de análise estatística, inteligência artificial e técnicas de visualização de dados (Esmaeilian et al., 2016).

Alguns conceitos relacionados às técnicas de *Business Intelligence* (BI) são destacados, como parte do contexto de integração de sistemas da Indústria 4.0, como (Lasi et al., 2014):

- Integração de sistemas físicos básicos e sistemas informáticos: novas opções de uso de informação em tempo real, através de RFID (*Radio Frequency Identification*) e sensores, permitem uma integração avançada em diversas aplicações industriais;
- Integração com outros setores econômicos: possibilidade de integração de empresas de manufatura com empresas de outros setores, como comércio, logística, serviços financeiros e outros fornecedores de serviços;
- Integração com outras indústrias e outros segmentos industriais: diferentes tipos de indústrias podem ser suportados por tecnologias de informação para aumentar a troca de informações e as trocas comerciais;
- Integração em redes dinâmicas de criação de valor: consideração de processos que adicionam valor ganha novos aspectos na Indústria 4.0, se a produção é inserida em redes dinâmicas durante todo o ciclo de vida do produto.

### 2.2.5. Computação visual

A computação visual, ou computação gráfica, pode auxiliar para o atingimento da Indústria 4.0, à medida que ela adiciona capacidades de digitalizar o físico, incluindo a simulação de sensores e atuadores, de interagir com o físico a partir do digital, com modelos em realidade virtual e realidade aumentada, de visualização em tempo real e interação com modelos digitais, e através da impressão 3D. Essas tecnologias dão uma ideia da contribuição que a computação visual pode dar, com objetivo de reproduzir e digitalizar o mundo físico (Posada et al., 2015).

A realidade virtual (*virtual reality* - VR) e a realidade aumentada (*augmented reality* - AR) são duas tecnologias que estão dentro da computação gráfica, mais precisamente no ramo das tecnologias de imersão, mas que possuem características diferentes na execução, e por isso mesmo possuem diferenças em suas aplicações em produtos e processos. A realidade virtual permite a imersão do usuário em um ambiente virtual, permitindo simulações, testes e sensações, em tempo real, sem que para isso o usuário necessite entrar em contato com o mundo físico, emulado virtualmente. Isso permite a realização de atividades remotas e através dos CPS, a conexão entre os elementos no mundo virtual criado, podendo incluir estruturas, máquinas, produtos e pessoas. Possui grandes aplicações para a digitalização da produção e interação com ambientes de difícil acesso ou ambientes em que não é possível a entrada ou permanência de seres humanos, ou mesmo para testar condições de uso de produtos antes mesmo de serem produzidos. Por outro lado, a realidade aumentada reproduz os elementos do mundo virtual no mundo real, através de câmeras e sensores, e a sobreposição de elementos gráficos digitais. Tem

grandes aplicações nas áreas de projeto, onde objetos concebidos e projetados são inseridos nos ambientes reais, com função de orientação e testes. Também possui aplicações em processos, onde através de dispositivos móveis, operadores podem ter orientação em tempo real para instruções e verificações das atividades. As duas tecnologias são complementares e permitem diversas aplicações, que podem reduzir tempos de processos e desenvolvimento de produtos, aumentar a eficiência de processos, além de prevenir falhas ainda na fase de projeto. São tecnologias com enormes potenciais de desenvolvimento e podem ser integradas entre si, e a outras tecnologias, como os modelos de operação remota, tecnologias de aprendizagem de máquinas, e a inteligência artificial, para criarem interação entre o mundo real e o mundo virtual.

Para que a interação entre homens e máquinas seja harmônica e eficaz, é necessário que haja interfaces de comunicação entre o mundo físico e o mundo virtual, possibilitada por protocolos de comunicação e *softwares* visuais, sistemas supervisórios, e *softwares* embarcados nos equipamentos, produtos, e em dispositivos móveis, que serão amplamente utilizados na manufatura avançada.

#### **2.2.6. Dispositivos e aplicações móveis**

Equipamentos e aplicações para eletrônicos, como *smartphones*, sistemas de navegação, Bluetooth, redes *wireless*, sistemas RFID, estão em uso no nosso dia a dia, e isso irá mudar nosso modo tradicional de trabalhar e também os conceitos de comunicação na indústria. Mas estas tecnologias ainda não estão amplamente difundidas no mundo fabril, o que sinaliza um enorme potencial de aumento da comunicação empresarial (Schmitt, Meixner, Gorecky, Seissler, & Loskyll, 2013).

Exemplos desses equipamentos são dispositivos móveis (*mobile devices*), tais como *tablets*, *palm tops*, *smartphones*, e também dispositivos acoplados ao corpo (*wearables technologies*), como óculos, braceletes, relógios, luvas, calçados, e demais vestimentas, que permitem a interação entre homens e máquinas em tempo real. Estes dispositivos, dotados de *softwares* embarcados, e com o auxílio de câmeras, *scanners*, sensores, conexões com a internet, sistemas de posicionamento GPS (*Global Positioning System*), transmissões RFID, entre outras tecnologias, podem trazer velocidade de comunicação e aumento de produtividade na realização de atividades no ambiente fabril. As aplicações possíveis são diversas, pois a interação das empresas com os consumidores pode gerar novas vendas e fidelizar os clientes, através de serviços de apoio e assistência técnica dinâmicos e adequados para cada perfil de consumidor. Também são diversas as oportunidades de novos negócios, a partir da união destas tecnologias, principalmente agregando-se serviços aos equipamentos.

#### **2.2.7. Equipamentos autônomos e inteligência artificial**

Em aplicações industriais, equipamentos autônomos de movimentação de materiais e de processos de fabricação, já são utilizados em linhas de produção e sistemas de armazenagem, mas ainda não estão amplamente difundidos. Suportados pelas tecnologias de inteligência artificial, e por sistemas de aprendizagem de máquinas (*machine learning*), tendem a alterar profundamente a organização do trabalho no futuro. Estações de trabalho completamente automatizadas, veículos sem condutores, e fábricas a trabalharem de forma intermitente

conferirão novos padrões de competitividade industrial, e podem alterar a competitividade das cadeias de abastecimento globais. Essa é a aposta dos países e das empresas de alta tecnologia, que investem na inovação, e que possuem instalações em países com alto custo de mão de obra. Setores que tradicionalmente são classificados como de mão de obra intensiva, serão transformados em capital intensivo, o que pode mudar a competitividade.

Sistemas autônomos de condução e de operação, já estão presentes em alguns modelos de veículos de passeio, e em veículos de transporte industriais, e estão sendo usados em ambientes reais. Serão comercializados em larga escala num futuro próximo. Sistemas colaborativos de controle de direção, e sistemas de controle de tráfego aéreo poderão se fundir, uma vez que veículos estão sendo desenvolvidos para trafegar não apenas no solo, mas também no ar, de forma autônoma e descentralizada. Isso exigirá uma capacidade enorme de comunicação entre os sistemas, e colaboração entre os setores da aviação e o automotivo.

A inteligência artificial possui aplicação nos mais diversos setores da indústria e dos serviços, através de algoritmos de aprendizagem de máquinas que evoluem rapidamente. Ela será responsável, integrada a outras tecnologias, por uma verdadeira revolução no mundo dos negócios, pois consegue conjugar a inteligência e discernimento dos humanos, com o trabalho incessante das máquinas, uma combinação que remete a cenários futuristas com humanoides ocupando o lugar de seres humanos nos mais diversos postos de trabalho. Iniciativas de colaboração, com algoritmos abertos, têm sido criadas e contam com milhares de desenvolvedores em todo o mundo, com objetivo de aperfeiçoar programas e criar novas funcionalidades.

Quanto mais *softwares* e inteligência forem embutidos em produtos e equipamentos, mais as tecnologias preditivas poderão intervir nos sistemas produtivos, através de algoritmos autônomos e inteligentes, que serão usados para prever por exemplo o desempenho ou a taxa de degradação dos produtos e das máquinas, e autonomamente gerenciar e otimizar os serviços agregados aos produtos. Em um cenário no limite dessa transformação mecatrônica possibilitada pelas novas tecnologias cibernéticas, está o conceito das fábricas escuras (*dark factories*), onde máquinas e robôs trabalharão de forma semiautônoma e descentralizada para fabricar e montar produtos, e executar tarefas de manutenção e organização, gerenciados remotamente. Também de forma remota, operadores poderão dar comandos corporais e cerebrais, que serão repetidos por robôs, devido a evolução das tecnologias de aprendizagem adaptativa (Lee, Kao, & Yang, 2014).

### **2.2.8. Tecnologias de manufatura aditiva**

A manufatura aditiva, ou impressão 3D (*3D printing*), como é comumente chamada, é uma técnica de fabricação através da adição de materiais em camadas justapostas para formar um objeto. Ela já está contribuindo para uma maior flexibilidade da indústria, trazendo novas soluções de produção (produtos mais flexíveis e complexos com baixo custo adicional) ou formando uma nova cadeia de fornecimento, com redução de estoques e prazos de entrega mais rápidos, ou mesmo uma combinação de ambos.

Para aplicações industriais, a modelagem e impressão 3D podem trazer a versatilidade e flexibilidade na geração de moldes, modelos de produtos inovadores, protótipos em tempo reduzido, além da possibilidade de fabricação de produtos impossíveis com as técnicas de

subtração. Os benefícios são muitos, como a redução de *lead time* de lançamento de produtos, prototipagem rápida, redução de custos ao longo da cadeia de valor e inovação.

Quanto às aplicações, a modelagem e impressão 3D tendem a abranger uma ampla gama de setores. Nas aplicações no setor de saúde, com a biotecnologia e na medicina, pode contribuir na recomposição e substituição de tecidos e até órgãos humanos inteiros, o que não é possível com as tecnologias atuais. Possuem ampla aplicação nos setores da arquitetura e construção civil, onde já existem impressoras de grandes dimensões que fabricam estruturas prediais e industriais complexas em tempo reduzido, com relação às tecnologias convencionais. Nas aplicações industriais, ela pode gerar uma verdadeira revolução nos métodos de projeto, fabricação e construção de produtos, abrangendo formas geométricas complexas, e a união de dezenas ou centenas de partes uma única peça. Pode ser utilizada em produtos de lote unitário (customizado), ou mesmo em processos de produção em massa.

Para utilização pessoal, a impressão 3D possui um grande potencial disruptivo, à medida que altera significativamente a cadeia de valor, pois com a possibilidade de fabricação própria, o usuário final pode ser ao mesmo tempo projetista, fabricante, e consumidor de um determinado produto. E ainda suprime diversas etapas logísticas, desde o transporte de matéria-prima e de produtos acabados. É uma tecnologia que ainda está em fase inicial de utilização pelos consumidores, possuindo amplo espaço de crescimento a nível mundial.

Tem enorme potencial de geração de novos modelos de negócios, tais como o desenvolvimento de *softwares* de modelagem 3D, desenvolvimento de matérias-primas para as impressoras, e das próprias impressoras, que tendem a ser mais flexíveis quanto à variedade de materiais a serem utilizados, e mais velozes na geração dos produtos.

### **2.3. Impactos da Indústria 4.0 nas transformações econômicas e sociais**

O ponto central de todas as revoluções industriais é o aumento da produtividade, associado ao aumento de volume e redução dos custos, e inovações em produtos e processos. As revoluções industriais anteriores tiveram um forte impacto a nível de chão de fábrica e dos processos produtivos. Entretanto, o impacto esperado pela quarta revolução industrial é mais amplo, e afeta outros processos de negócios além da produção, como por exemplo a engenharia de produtos e o relacionamento das organizações com a sua cadeia de abastecimento e com os clientes, e até mesmo os próprios modelos de negócios das empresas. Isso significa que o potencial de aumento de produtividade está baseado na intensificação das atividades criativas e de novos conhecimentos e também pelo processo de tomada de decisões. A colaboração em todos os níveis de atividade pode ajudar a acelerar este processo, devido à grande disseminação das tecnologias de informação e comunicação (Schuh et al., 2014).

A Indústria 4.0 irá requerer novas competências dos trabalhadores, e muitas funções rotineiras serão substituídas por sistemas ciber-físicos, e os trabalhadores serão requeridos para realizar funções que exigem mais criatividade e adicionam mais valor baseado no conhecimento. Com relação aos impactos econômicos e sociais derivados da Indústria 4.0, os mesmos podem ser positivos, com oportunidades de criação de novos negócios, novas profissões, e espaço para o surgimento de pequenas e médias empresas, em decorrência da informatização e da servitização dos produtos. Esta estratégia é compatível com a percepção de

que o mundo entrou na era pós-industrial e que as economias desenvolvidas gerarão mais valor com a produção e comercialização de conhecimento e serviços. Este sistema produto-serviço contempla a existência de infraestrutura e redes de suporte ao cliente, e é projetado para satisfazer as necessidades dos consumidores, ao mesmo tempo ser mais competitivo do que nos modelos de negócios com orientação apenas ao produto (Lee et al., 2014). Mas também podem trazer consequências negativas, como a concentração de riquezas nos países desenvolvedores de tecnologia, e o aumento do desemprego, principalmente em países subdesenvolvidos. Tendo em consideração as mudanças demográficas, com o aumento da idade média da população em diversos países, uma consequência é que os trabalhadores terão suas carreiras alongadas e poderão se manter produtivos por mais tempo (Kagermann et al., 2013)

Um cenário possível para os impactos das transformações econômicas e sociais da quarta revolução industrial, seria o aumento do número de postos de trabalho devido ao surgimento de novas profissões e áreas de negócio. Outro seria o desemprego, devido principalmente à substituição da mão de obra por equipamentos robóticos e autônomos. Segundo Schwab (2016), um dos fundadores do Fórum Econômico Mundial, não é possível prever neste momento qual cenário é mais provável de acontecer, e a história mostra que é mais provável uma combinação dos dois. Entretanto, ele afirma que o talento será um fator crítico para a produção de bens e serviços, mais do que o capital. Isso levaria ao crescimento da segregação do mercado de trabalho, se diferenciando em duas divisões: os de poucas habilidades e baixos salários, e os de altas habilidades e altos salários. Esta configuração tende a elevar o nível de tensões sociais e conflitos, especialmente nos países subdesenvolvidos e emergentes.

Os impactos ambientais decorrentes dos novos processos de industrialização e das novas tecnologias da Indústria 4.0 estão diretamente relacionados ao uso de recursos naturais, nas fontes de energia utilizadas em todo o ciclo de vida dos produtos e nos processos de descarte e reciclagem de materiais, através da logística reversa. Devido à expectativa de expansão da população mundial, é necessário um esforço muito grande dos países mais industrializados para que tomem iniciativas para minimização dos danos ambientais, e a adoção de práticas sustentáveis de utilização de recursos naturais e de descarte de materiais e produtos. A criatividade e inovação no desenvolvimento de produtos deve ser acompanhada de uma forte consciência ambiental na gestão de todo o ciclo de vida dos produtos.

É necessário que sejam analisados e quantificados não somente os impactos da inovação tecnológica sobre a produtividade e competitividade das empresas, mas também os decorrentes do possível desemprego e suas consequências (principalmente em países subdesenvolvidos), da motivação dos trabalhadores com relação ao conteúdo do trabalho, da capacitação para lidar com as altas tecnologias, enfim de tudo que cerca o mundo do trabalho, que será profundamente transformado. Assim, algumas questões como flexibilidade no trabalho, o trabalho remoto, cuidados de saúde, as mudanças demográficas e a vida privada das pessoas, precisam ser consideradas em uma análise holística das transformações esperadas. Nas relações de trabalho do futuro, será esperado do trabalhador muito mais da sua própria iniciativa e de habilidades subjetivas, como a comunicação, autonomia, responsividade, entre outras habilidades, que serão necessárias no cenário de processos automatizados e em tempo real. Isso gerará oportunidades em termos de enriquecimento e empoderamento dos trabalhadores, em um

ambiente mais interessante e inovador, maior autonomia nas decisões e mais oportunidades para o autodesenvolvimento (Kagermann et al., 2013).

Atualmente, alguns governos de países como por exemplo a Finlândia, a Noruega, a Islândia e a Suíça, já discutem alternativas de garantir uma renda mínima para a população, independente de trabalharem ou não. Na Suíça, no ano de 2016, já houve até um plebiscito junto à população para esta questão, que naquela circunstância foi rejeitado. E na Finlândia, já está em prática um projeto piloto com um número limitado de famílias, que recebem uma renda mínima, independente de trabalharem ou não. Será essa uma tendência no futuro? Que alguns países, com perfil demográfico de idade elevada, de alta renda *per capita* e com alto nível de automação industrial, alterem radicalmente o conceito de rendimento, que já não seria mais pelo trabalho, mas sim por outra metodologia a ser adotada. Isso provocaria mudanças significativas dos atuais conceitos de meritocracia e remuneração do trabalho, uma vez que a riqueza e valor adicionado aos negócios (que geram os impostos), seriam em grande parte gerados por sistemas ciber-físicos, com menor interação humana. Esse já é um assunto de debate internacional.

## **2.4. Iniciativas e programas da Indústria 4.0 em diversos países**

Em função da ascensão dos tigres asiáticos, com o modelo de industrialização orientada para exportação, o processo de desindustrialização da Europa aumentou nas últimas décadas e ela perdeu cerca de um terço de sua base industrial nos últimos 40 anos (European Parliament, 2015). A desindustrialização também foi verificada em países como o Brasil, a Austrália, os Estados Unidos, e em diversos países periféricos. Os custos de produção e logística dos países asiáticos se tornaram muito competitivos e contaram com forte apoio governamental para a expansão de suas indústrias e para atração de empresas estrangeiras.

Os Estados Unidos desenvolveram, ao longo de sua história, uma infraestrutura institucional que estimula o desenvolvimento de inovações tecnológicas e de pesquisa e desenvolvimento aplicado ao setor industrial, apoiada por uma ampla rede de universidades e laboratórios, bem como de órgãos governamentais, o que se traduz no posicionamento do país como o maior produtor de bens industrializados e de serviços do mundo. Porém, nas últimas décadas, a manufatura americana diminuiu bastante sua proporção no PIB, assim como a quantidade de empregos proporcionalmente ao total de postos de trabalho. Assim, os déficits comerciais aumentaram, o país perdeu a liderança das exportações, e os gastos em P&D das empresas americanas realizados fora do país cresceram a taxas três vezes maiores que os gastos domésticos, uma vez que a produção foi parcialmente transferida para outros países (*offshoring*), e a distância dos centros produtores fez diminuir a P&D doméstica (Daudt & Willcox, 2016). Isso se deveu essencialmente a dois fatores, ao processo de servitização da economia, onde o setor de serviços teve um crescimento muito grande, e à migração da produção industrial para os países asiáticos, que possuíam menores custos globais.

Como forma de reduzir esse processo de desindustrialização, e aumentar a competitividade das empresas, a América do Norte (Estados Unidos e Canadá), alguns países asiáticos e a Europa, estabeleceram um forte compromisso industrial com visão de longo prazo, que está fundamentado na integração entre empresas de tecnologia, organizações governamentais e instituições de pesquisa e inovação.



Apesar da pequena amostra de referências bibliográficas que tratam dos programas desenvolvidos pelos governos e iniciativas de organizações público-privadas, como pôde ser observado na revisão sistemática da literatura realizada por Liao, Deschamps, Loures, & Ramos (2017), alguns exemplos são citados abaixo para contextualizar os desenvolvimentos de iniciativas interorganizacionais relacionadas à Indústria 4.0 em diversos países.

#### 2.4.1. Alemanha – *Plattform Industrie 4.0* e o *Smart Factory*

A terminologia “Indústria 4.0” teve início na Alemanha e evoluiu através da interação de três organizações, sendo elas o BITKOM (representando empresas de tecnologia de informação), VDMA (representando as indústrias de máquinas e equipamentos) e ZVEI (representando fornecedores de equipamentos elétricos e eletrônicos), e com um forte suporte do governo alemão. Para coordenar as iniciativas da Indústria 4.0 na Alemanha, foi criada a *Plattform Industrie 4.0*, uma iniciativa que contempla, além das organizações acima citadas, órgão federais do governo alemão, empresas privadas de diversos setores e portes, instituições de ensino e pesquisa, laboratórios e centros de desenvolvimento tecnológico públicos e privados (Vogel-Heuser & Hess, 2016). Foi publicado pelo grupo organizador um relatório, resultado final das discussões e pesquisas realizados, com as recomendações para implementação das iniciativas para a consolidação da Indústria 4.0 (Kagermann et al., 2013).

A realização desta quebra de paradigma é tratada na Alemanha como um projeto de longo prazo, e envolverá um processo gradual de mudanças, com a participação de diversas organizações, cada qual dando a sua contribuição para o atingimento da visão de futuro da Indústria 4.0 para a Alemanha, com enorme potencial para a indústria de manufatura, com a estratégia de serem líderes no fornecimento de equipamentos e soluções de tecnologia para a Indústria 4.0, especialmente nos setores automotivo e de energia.

O *German Research Center for Artificial Intelligence* (DFKI), na Alemanha, é reconhecido como um centro de excelência no desenvolvimento de novas tecnologias adaptativas e cognitivas, e de inteligência artificial, onde homens e máquinas colaboram para melhorar o desempenho de sistemas produtivos, que simulam e reproduzem ambientes industriais. O programa *Smart Factory*, desenvolvido pelo DFKI, em parceria com universidades e instituições de ciência e tecnologia, tem como objetivo a investigação e desenvolvimento de tecnologias com os seguintes pilares: operadores inteligentes, produtos inteligentes, máquinas inteligentes e planejadores inteligentes, onde existe colaboração e aprendizado em tempo real (Kolberg & Zühlke, 2015). O *Fraunhofer*, uma rede de institutos tecnológicos criado no pós-guerra, é apontado como um dos principais pilares da política industrial alemã, com sua contribuição em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para o setor industrial (Daudt & Willcox, 2016).

A implementação da Indústria 4.0, na visão do grupo de trabalho *Industrie 4.0 Platform*, requer ações em oito processos chave: (1) padronização e arquitetura de referência; (2) gerenciamento de sistemas complexos; (3) infraestrutura de redes de comunicação segura e de alta qualidade; (4) proteção e segurança dos produtos, dos recursos de produção e da informação; (5) organização do trabalho; (6) treinamento dos profissionais; (7) ambiente regulatório; e (8) eficiência na utilização dos recursos (Kagermann et al., 2013; L. Wang, Törngren, & Onori, 2015).

#### 2.4.2. Estados Unidos e Canadá

Para responder à redução da participação do setor industrial na economia do país, os Estados Unidos, assim como a Europa, desenvolveram programas estratégicos de política industrial e de parcerias público-privadas, com base na inovação tecnológica, se antecipando às demandas presentes e futuras de bens industrializados e serviços de alta tecnologia.

Criado nos Estados Unidos em 2014, o *Industrial Internet Consortium* (IIC) se define como uma parceria global sem fins lucrativos da indústria, do governo e das universidades, com a função de coordenar e sustentar o desenvolvimento e aplicação das tecnologias de manufatura avançada nos Estados Unidos, em parceria com organizações de outros países, como a *Plattform Industrie 4.0*, da Alemanha. O IIC possui como missões (IIC, 2017):

- i) Direcionar a inovação através da criação de casos de uso industriais e bancos de provas para aplicações no mundo real;
- ii) Definir e desenvolver a arquitetura de referência e demais estruturas necessárias para interoperabilidade dos sistemas;
- iii) Influenciar o processo de padronização global de desenvolvimento para a internet e sistemas industriais;
- iv) Facilitar fóruns abertos para partilha e troca de ideias e soluções do mundo real, práticas, lições aprendidas e percepções;
- v) Construir uma visão de confiança entorno das novas e inovadoras abordagens para a proteção e segurança;

O IIC está organizado em subgrupos temáticos, cada um com o objetivo de trazer soluções específicas para determinados temas, como por exemplo: arquitetura de referência, conectividade, gestão de dados distribuídos e interoperabilidade, análise de dados industriais, inovação, tecnologias de entrada e de saída, segurança e, taxonomia (IIC, 2017).

A partir da constatação de que os Estados Unidos estavam perdendo competitividade com relação a outros países, foram criados grupos de trabalho entre instituições nacionais, em uma tentativa de revitalizar a indústria e a competitividade americana, como por exemplo o “*National Network for Manufacturing Innovation*” (NNMI), e o *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP), uma organização público-privada de representantes de instituições de ensino e pesquisa, de empresas de diversos setores da economia americana e de órgãos públicos, que apresentou em 2014 o relatório “*Report to the President - Accelerating U.S. Advanced Manufacturing*” (CNI, 2016a) e (Zhou et al., 2016). Foram desenvolvidos planos estratégicos, com a missão de transformar as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico em projetos de fato aplicáveis e eficientes em custo, e transformar as capacidades de alta performance da manufatura americana em novos produtos e serviços (National Science and Technology Council, 2016). O NNMI contou com o apoio de diversas instituições que colaboram para o programa e foram definidos os seguintes objetivos de médio e longo prazos:

- Aumentar a competitividade da manufatura americana;
- Facilitar a transição de tecnologias inovadoras em capacidades de manufatura de escala industrial, eficientes em custo e de alta performance;
- Acelerar o desenvolvimento da capacitação da força de trabalho para a manufatura avançada;

- Suportar modelos de negócio que ajudem os institutos especializados para se tornarem estáveis e sustentáveis.

O plano estratégico cita dez áreas estratégicas para a competitividade da indústria americana (National Science and Technology Council, 2016):

- 1) Inovação orientada pelo talento humano;
- 2) Sistema legal e regulatório;
- 3) Custo e disponibilidade de mão de obra e materiais;
- 4) Infraestrutura física;
- 5) Questões econômicas, comerciais, financeiras e tributárias;
- 6) Investimento governamental na manufatura e na inovação;
- 7) Política energética e custos de energia;
- 8) Atratividade do mercado doméstico;
- 9) Sistemas de cuidados de saúde;
- 10) Rede de fornecedores.

O *Intelligent Manufacturing System Centre* (IMSC), da Universidade de Windsor, no Canadá, é definido por ElMaraghy & ElMaraghy (2016) como o estado da arte para indústrias de montagem de produtos. O IMSC realiza pesquisas avançadas e inovadoras no desenvolvimento de novos produtos, além de projetos aplicados em processos e ferramentas inovadoras de sistemas de manufatura, em colaboração com outras universidades, empresas e outras instituições de pesquisa. Conta com células avançadas de manufatura e estúdios de *design* como o *iFactory* e o *iStudio*, além de dispositivos de metrologia e prototipagem avançados.

#### 2.4.3. China - *Made in China 2025*

Anunciado em março de 2015 e inspirado no projeto alemão "*Industrie 4.0*", é um programa estratégico para atualizar a indústria da China, tornando-a mais eficiente e integrada, visando aumentar a participação estratégica do país na cadeia global de produção. Baseia-se nos seguintes aspectos: concentração em todo o processo de fabricação e não apenas na inovação; promoção do desenvolvimento não apenas de indústrias avançadas, mas das indústrias tradicionais e serviços modernos; foco no sistema de normas internacionais, ao invés de normas técnicas nacionais; definição de medidas claras e específicas para inovação, qualidade, fabricação inteligente e produção verde, com as referências identificadas de 2013 e 2015 e metas estabelecidas para 2020 e 2025. O *Made in China 2025* propõe cinco projetos estratégicos: a construção de centros de inovação em fabricação, projetos de fabricação inteligentes, projetos de fortalecimento da indústria de base, projetos de fabricação verde, e projetos de inovações disruptivas em equipamentos (Qin et al., 2016).

A China está se esforçando para expandir sua indústria de engenharia mecânica, com objetivo de reduzir a dependência de tecnologias importadas e perseguir a liderança global em tecnologia em sete setores industriais estratégicos, incluindo equipamentos avançados de manufatura, e tecnologias de informação. No setor de máquinas-ferramenta, as prioridades são o desenvolvimento de sistemas inteligentes de manufatura, sistemas inteligentes de controle, e equipamentos avançados de controle numérico computacional (CNC). Na área de tecnologias

de informação, as prioridades estão nas áreas da internet das coisas e aplicações, com foco em sistemas de controle e automação industrial (Kagermann et al., 2013).

#### **2.4.4. Iniciativa europeia - *Factories of the future* (FoF)**

É uma iniciativa da União Europeia, na forma de parceria público-privada, lançada dentro da estratégia *Horizon 2020*. No ano de 2016, foi lançado pela *European Factories of the Future Research Association* (EFFRA) o documento *Factories 4.0 and beyond*, que contém recomendações para o programa para os anos seguintes até 2020, além de descrever as principais áreas prioritárias de ação e os principais temas de pesquisa. As cinco áreas prioritárias de ação identificadas no programa, conforme FoF (2016), são:

- 1) Redes de valor ágeis:** tamanho de lotes unitários;
- 2) Excelência na manufatura:** manufatura avançada de processos e serviços para processos e produtos inovadores e com zero-defeito;
- 3) O fator humano:** desenvolvimento de competências humanas em sinergia com o progresso tecnológico
- 4) Redes de valor sustentáveis:** a manufatura direciona uma economia regenerativa e circular;
- 5) Plataformas de manufatura digitais interoperáveis:** suporta um ecossistema de serviços na manufatura.

O objetivo geral da iniciativa *Factories of the future* é possibilitar uma maior competitividade e sustentabilidade para a indústria europeia, gerando crescimento e preservando os empregos. Conta com a participação de pequenas, médias e grandes empresas, universidades, instituições de pesquisa, e associações de toda Europa (FoF, 2016), que juntas trabalham para identificar e realizar as transformações através dos seguintes domínios de pesquisa e inovação:

- Processos de manufatura avançada;
- Sistemas de manufatura inteligentes e adaptáveis;
- Fábricas digitais, virtuais, e eficientes na utilização de recursos;
- Empresas colaborativas e móveis;
- Manufatura orientada ao ser humano;
- Manufatura orientada ao cliente.

Atingir as transformações identificadas, requer esforços coordenados de pesquisa e inovação, onde os desafios e oportunidades na manufatura sejam possibilitados pelas tecnologias habilitadoras e pelas tecnologias aplicadas, identificadas como: processos e tecnologias avançados de manufatura; mecatrônica para sistemas de manufatura avançados; tecnologias de informação e comunicação; estratégia de manufatura; trabalhadores do conhecimento e modelagem; métodos e ferramentas de simulação e previsão (FoF, 2013).

#### **2.4.5. Iniciativa Portugal i4.0**

Em Portugal, as ações pertinentes à implementação da Indústria 4.0 estão centradas na “Iniciativa Portugal i4.0”, e resultam do trabalho desenvolvido por organizações públicas (através do Ministério da Economia) e privadas, através de entrevistas, workshops e audições com os principais intervenientes de diferentes setores da economia portuguesa, das quais

resultou um conjunto de necessidades e recomendações para a definição da estratégia a adotar a curto e médio prazo, e orientar medidas (públicas e privadas) com vista a atingir três objetivos centrais (COTEC, 2017):

- Acelerar a adoção das tecnologias e conceitos da Indústria 4.0 no tecido empresarial português;
- Promover empresas tecnológicas portuguesas a nível internacional;
- Tornar Portugal um polo atrativo para o investimento no contexto da Indústria 4.0.

O comitê estratégico da Iniciativa Portugal i4.0, formado por aproximadamente 80 empresas de diversos setores, desenvolveu no ano de 2016 um relatório com o objetivo de apresentar um plano de medidas iniciais de valorização, promoção e investimento na digitalização da economia portuguesa. Ele é a base técnica para a definição de políticas no âmbito de uma estratégia nacional para a digitalização da economia. A metodologia desenvolvida para esta iniciativa envolveu a realização de entrevistas individuais, estudo de outras iniciativas europeias e sessões de discussão em grupo. O relatório, com as recomendações, é resultado da consulta a mais de 120 instituições públicas e privadas, e sintetiza as medidas iniciais para a materialização da estratégia definida em cada um de seis eixos de atuação prioritária (COTEC, 2017):

- 1) **Capacitação dos Recursos Humanos** - adequar os conteúdos formativos do sistema de ensino nacional às novas tecnologias e promover medidas de requalificação e formação de profissionais.
- 2) **Cooperação tecnológica** - promover a cooperação para o desenvolvimento e subsequente implementação de soluções e tecnologias inovadoras no quadro da 4ª revolução industrial.
- 3) **StartUp i4.0** - reconhecer o papel das *Startups* na inovação tecnológica e desenvolver um conjunto de medidas direcionadas à Indústria 4.0 em linha com a Estratégia Nacional para o Empreendedorismo da *Startup* Portugal.
- 4) **Financiamento e apoio ao investimento** - desenvolver um conjunto de mecanismos de financiamento destinados a projetos de âmbito Indústria 4.0 de forma a acelerar os investimentos e incentivar a adoção por parte do tecido empresarial português.
- 5) **Internacionalização** - promover a tecnologia portuguesa para o mercado externo, incentivando assim a internacionalização das empresas e a atração de investimento no país.
- 6) **Adaptação legal e normativa** - garantir adaptabilidade legal e normalização técnica face aos desafios da nova revolução industrial, criando um ambiente propício ao desenvolvimento e investimento tecnológico.

Foram definidas cerca de 64 medidas, contemplando todos eixos prioritários de ação, a serem exercidas por diferentes responsáveis (órgãos governamentais, empresas públicas e privadas, instituições de ensino e pesquisa, associações), com objetivo de implementá-las e monitorarem o alcance dos objetivos. Uma das medidas é a criação de um modelo de avaliação de maturidade, que coincide com o foco deste trabalho, justificando a sua relevância. O desenvolvimento da iniciativa Portugal i4.0 pressupõe a criação de uma plataforma digital, que será o principal instrumento para comunicação e interação entre os vários intervenientes,

funcionando como interface em futuras atividades desenvolvidas no âmbito da estratégia para a Indústria 4.0 no país (COTEC, 2017).

#### **2.4.6. Iniciativa da Indústria 4.0 no Brasil**

No Brasil, o Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC), e o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) criaram o Grupo de Trabalho da Indústria 4.0, com a participação de diversas instituições, entre elas a Confederação Nacional da Indústria (CNI), com objetivo de elaborar o plano de ações para Indústria 4.0 no Brasil. MDIC e MCTIC (2016) abordam as perspectivas para a implementação da manufatura avançada no Brasil.

O nível de heterogeneidade da indústria brasileira, bem como as diferentes capacidades de cada setor em compreender e implementar ações de atualização tecnológica, exigirá que as políticas sejam adaptadas para diferentes conjuntos de setores e de empresas, que assumirão velocidades e condições diferenciadas. Nesse contexto, a CNI está elaborando, no âmbito do Conselho Temático Permanente de Política Industrial e Desenvolvimento Tecnológico (COPIN), uma agenda de propostas sobre o tema. A agenda aborda sete dimensões prioritárias para o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil (CNI, 2016a). São elas:

- 1) Aplicações nas cadeias produtivas e desenvolvimento de fornecedores** - é importante identificar as cadeias produtivas que precisarão se adaptar a este novo paradigma num prazo mais curto a fim de se manterem internacionalmente competitivas.
- 2) Mecanismos para induzir a adoção das novas tecnologias** - O baixo conhecimento sobre as tecnologias digitais e seus benefícios, revelado pela Sondagem Especial - Indústria 4.0, da CNI, conforme (CNI, 2016b), uma pesquisa realizada com 2.225 empresas, indicam a necessidade de um esforço de disseminação de conhecimento sobre o tema. O intercâmbio tecnológico e comercial com outros países será fundamental para o acesso ao conhecimento. A ampla oferta de tecnologias no escopo da Indústria 4.0 dificulta a identificação, por parte dos usuários, das formas mais eficientes para atender suas necessidades.
- 3) Desenvolvimento tecnológico** - o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil criará oportunidades para o desenvolvimento de fornecedores domésticos de soluções, dentro no novo ambiente tecnológico. Para que essas oportunidades sejam adequadamente aproveitadas, será necessário desenvolver e fortalecer instrumentos de apoio ao desenvolvimento tecnológico das empresas locais. A necessidade de customização das soluções existentes para diferentes clientes, dos mais variados setores, cria evidentes oportunidades para serviços ligados, por exemplo, aos setores de *software* e integração de sistemas, onde o país já dispõe de competente base instalada.
- 4) Ampliação e melhoria da infraestrutura de banda larga** - na Indústria 4.0 os fluxos de informações são essenciais para o funcionamento da produção. Assim, a limitada infraestrutura de banda larga e rede móvel são entraves para seu funcionamento.
- 5) Aspectos regulatórios** - A arquitetura da internet pode ser dividida em camadas, cada qual com características próprias. É possível segmentá-la em infraestrutura física (cabos, satélites, dispositivos), lógica (padrões técnicos) e aplicações (conteúdos). Sobre os atores, é possível dividi-los em provedores de conexão, provedores de aplicação, provedores de infraestrutura de

telecomunicações, indústria de bens de informática, de bens de telecomunicações e de software, e ainda, setor empresarial usuário. Em todos os casos, é preciso que a regulação atue como indutora da inovação e da mudança tecnológica.

**6) Formação de recursos humanos** - As novas formas de produção decorrentes da Indústria 4.0 exigem profissionais com formação distinta das existentes. A integração de diversas formas de conhecimento, característica desse modo de produção, exigirá equipes multidisciplinares, com elevado nível de conhecimento técnico e com capacidade de interação de diferentes áreas de conhecimento.

**7) Articulação institucional** - A atuação coordenada entre os diversos atores públicos que lidam direta ou indiretamente com os temas ligados à digitalização da economia, bem como a articulação destes com associações e empresas privadas, será fundamental para que o Brasil consiga aproveitar todas as oportunidades associadas à incorporação e ao desenvolvimento de soluções no país.

Uma iniciativa de impulso à inovação e disseminação de tecnologias recentemente adotada no Brasil foi a criação dos Institutos SENAI de Inovação e Tecnologia, que são centros de referência em determinadas áreas de conhecimento e aplicações industriais, formando uma rede para o desenvolvimento de produtos e processos inovadores, além de serviços tecnológicos para as empresas. Eles foram inspirados na consolidada e famosa rede *Fraunhofer* da Alemanha.

#### 2.4.7. Comparação sintética entre as iniciativas dos países analisados

Além dos programas dos países destacados acima, outros países desenvolveram ou estão desenvolvendo estratégias e criando grupos de trabalho, com objetivos de reforçar a competitividade de suas indústrias, como a Itália que criou o programa *Piano Nazionale Industria 4.0*, a França que criou a iniciativa *New Industrial France*, a Inglaterra com o programa *The future of manufacturing* (Foresight, 2013), as iniciativas *Industrial Value Chain Initiative* e *Connceted Manufacturing* no Japão, entre outros países relevantes para a economia e para o comércio mundial.

As diretrizes estratégicas, as áreas prioritárias de ação e os objetivos de médio e longo prazos dos diversos países analisados, convergem para alguns pontos comuns, como o embasamento de todos eles pelas principais tecnologias habilitadoras (*key enabling technologies*), que são os CPS, o *Big Data*, a internet das coisas (IoT), a computação em nuvem, que foram descritas nos subcapítulos anteriores. E todos eles se esforçam para redefinir as ações estratégicas que os coloquem como atores principais neste processo de transformação da manufatura e dos serviços agregados a ela. Convergem também na constatação de que a digitalização dos processos produtivos e dos processos de engenharia de produto serão uma união do mundo real e do mundo virtual, e que essa união tem o potencial de aumentar a produtividade dos processos, acelerar o desenvolvimento de produtos, aumentar a qualidade e reduzir os prazos de entrega dos mesmos, tornando as atuais cadeias de valor, em cadeias ágeis, altamente responsivas às demandas dos clientes, através do aumento do fluxo de informações entre os participantes da cadeia. Todas essas mudanças serão possibilitadas pela implementação de tecnologias transformadoras e de alto impacto para as organizações.

## 2.5. Desafios e tendências para implementação da Indústria 4.0

Para o sucesso da implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 nas empresas de manufatura, e para as fabricantes de soluções tecnológicas industriais, existem algumas barreiras a serem ultrapassadas. Kagermann et al. (2013) afirmam que devem ser considerados os três aspectos seguintes:

- 1) Integração vertical e sistemas integrados de manufatura** – integração de diferentes níveis hierárquicos dentro de uma organização, desde estações de trabalho, células e linhas de produção, integrando as atividades associadas a cadeia de valor, como por exemplo *marketing* e vendas, ou desenvolvimento tecnológico. É preciso entender como os sistemas ciber-físicos poderão ser usados para criar sistemas de manufatura flexíveis e reconfiguráveis.
- 2) Integração horizontal através das cadeias de valor** – relacionamento inteligente interempresarial e através da cadeia de valor durante o ciclo de vida do produto, e também entre cadeias de valor de produtos e serviços acessórios ao principal.
- 3) Integração digital entre os diversos elos da cadeia de valor da Engenharia** – realização dos processos de Engenharia digital através das fases do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matéria-prima passando pelo sistema de produção, a utilização do produto e até o fim de sua vida útil.

Outro desafio a ser superado no atual ambiente de competitividade nos negócios, é o desafio em lidar com o grande volume de dados, que impedem uma rápida tomada de decisão. Muitos sistemas de manufatura não estão preparados para gerenciar esses dados devido à falta de ferramentas inteligentes de análise e resposta (Lee et al., 2014).

Segundo Wang et al. (2015), a principal barreira para a exploração plena das tecnologias dos sistemas ciber-físicos (CPS), continua a ser a indústria bastante conservadora, que possui margens apertadas, o que não permite assumir maiores riscos estratégicos. Os autores afirmam que os CPS precisam encontrar tecnologias de transição, através das quais as ideias realmente inovadoras possam gradualmente ser introduzidas no chão de fábrica, sem incorrer em grandes investimentos. Para Rennung et al. (2016), o aumento da complexidade dos produtos e processos, a volatilidade dos mercados e o encurtamento dos ciclos dos produtos, das tecnologias e da inovação são alguns exemplos dos desafios atuais e futuros da manufatura.

Outro grande desafio para a plena implementação da Indústria 4.0 é a padronização de comunicação entre os diversos sistemas eletrônicos e digitais a serem conectados. Como muitas organizações (*International Telecommunication Union, International Electro-technical Commission, International Organization for Standardization, Institute of Electrical and Electronics Engineers, European Committee for Electro-technical Standardization, China Electronics Standardization Institute, e American National Standards Institute*) estão envolvidas no desenvolvimento de normas de padronização da internet das coisas, é necessária uma forte coordenação entre as diferentes organizações de padronização, no sentido de coordenar e governar as relações entre as organizações internacionais e organizações nacionais e regionais de padronização (Xu et al., 2014).

Na prática, o potencial da Indústria 4.0 é de difícil assimilação por muitas pequenas e médias empresas, porque a falta de domínio pela equipe de gestão em como adaptar as novas



tecnologias, e a falta de conhecimento dos conceitos para uma conexão com parceiros externos que possam adicionar valor, bloqueia essas empresas de usar estes potenciais. Então, elas correm o risco de ficar atrás do progresso tecnológico e perderem competitividade. Também falta a essas empresas conhecimento de ferramentas práticas para a obtenção de informações e metodologias que permitam a integração dos diversos recursos humanos e tecnológicos, e assim atualizarem suas estratégias competitivas com base nos impactos da adoção ou não dos novos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Quanto antes as empresas possam perceber estes impactos para a competitividade, mais chances terão de se anteciparem. Para tal, é necessário investimento em profissionais e parceiros que promovam o alinhamento estratégico e operacional com base nas necessidades dos mercados em que atuam, nas tecnologias emergentes relacionadas aos negócios e às necessidades de investimento para suportar as mudanças necessárias (Kagermann et al., 2013).

De Carolis, Tavola, & Taisch (2017) apresentam uma análise das lacunas para a transformação das atuais indústrias 3.0 para as indústrias 4.0, elencando 11 *gaps* existentes, e que precisam ser solucionados. São eles:

- 1) Incertezas dos benefícios do retorno sobre os investimentos e de custos não conhecidos, além da falta de indicadores de performance adequados para esta medição;
- 2) Problemas de comunicação entre produtos inteligentes e fábricas antigas;
- 3) Complexidade *versus* usabilidade;
- 4) Proteção de dados e privacidade;
- 5) Integração e interoperabilidade;
- 6) Dificuldades na transformação das fábricas atuais em fábricas baseadas nos CPS;
- 7) Incertezas na confiabilidade do desempenho dos sistemas;
- 8) Segurança e limites de proteção nas linhas de produção;
- 9) Migração das tecnologias antigas para os CPS;
- 10) Regulações sobre a organização do trabalho;
- 11) Gerenciamento da complexidade.

A digitalização de processos, produtos e equipamentos é um dos principais fundamentos da Indústria 4.0, e o desenvolvimento de modelos virtuais envolverá inicialmente maiores valores de investimento do que abordagens que não o utilizarem. Isto é devido ao fato de atividades que adicionam valor serem antecipadas para um estágio anterior no processo produtivo, com objetivo de reduzir custos e melhorar a performance de atividades posteriores. Isso remete imediatamente à questão sobre quando a modelagem computacional é eficiente em custos. As empresas mais prováveis de aceitarem maiores valores de investimento são indústrias com alto volume de produção, como por exemplo o setor automobilístico ou indústrias com normas de segurança muito rigorosas, como por exemplo a indústria da aviação. Com a evolução e maior disseminação de *hardwares* e *softwares*, e qualificação de pessoal para modelagem computacional, maior será a abrangência de pequenas e médias empresas que poderão usufruir dos benefícios das tecnologias para aumento de produtividade, de qualidade e de redução de custos, inclusive as que produzirem em pequenos lotes ou mesmo em lotes individuais. Novas tecnologias requerem um alto nível de maturidade para gerarem retorno em um tempo razoável. Também requerem a qualificação dos trabalhadores para uma visão futura,

a fim de gerar produtos e processos inovadores e melhorados (Erol, Jäger, Hold, Ott, & Sihm, 2016; Kagermann et al., 2013).

No relatório resultado de uma pesquisa de maturidade, Lichtblau et al. (2015) apresentam os principais obstáculos identificados pelas empresas pesquisadas para que obtenham sucesso no caminho da implementação da Indústria 4.0, sendo eles a razão para o não atingimento dos níveis de maturidade desejados pelas empresas:

- Falta de clareza sobre os benefícios econômicos
- Falta de conhecimento ou mão de obra qualificada
- Falta de normatização e padrões
- Falta de confiança na segurança dos dados
- Questões legais não resolvidas
- Falta de cultura corporativa para os conceitos da Indústria 4.0
- Falta de informação sobre a necessidade do mercado
- Infraestrutura de rede de internet inadequada
- Falta de recursos financeiros para realizar os investimentos
- Burocracias internas e questões regulatórias
- Falta de abertura da força de trabalho para a digitalização

Com objetivo de superar os obstáculos mencionados acima, o relatório sugere algumas ações a serem tomadas pelas empresas que desejam se engajar no caminho da transformação da Indústria 4.0, e que geralmente passam pelos obstáculos listados acima. Resumidamente, as ações recomendadas por Lichtblau et al. (2015) são as descritas na Tabela 3:

*Tabela 3 – Ações de resposta das empresas conforme o nível de maturidade – adaptado de Lichtblau et al. (2015)*

NÍVEL	AÇÕES DE RESPOSTA
<b>Newcomers</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criar a conscientização para a Indústria 4.0 dentro da organização.</li> <li>• Estabelecer a Indústria 4.0 na estratégia e na cultura corporativa.</li> <li>• Criar as fundações tecnológicas para construir uma fábrica inteligente.</li> <li>• Começar a integrar componentes e sistemas.</li> <li>• Expandir o portfólio de produtos e serviços.</li> <li>• Desenvolver as habilidades básicas da força de trabalho.</li> </ul>
<b>Learners</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar indicadores para monitorar a implementação da estratégia</li> <li>• Expandir as fundações tecnológicas</li> <li>• Aumentar as capacidades de análise de dados</li> <li>• Expandir as habilidades básicas da força de trabalho</li> </ul>
<b>Leaders</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estender a fábrica inteligente para a integração ao longo da cadeia de valor</li> <li>• Buscar a total digitalização dos processos</li> <li>• Desenvolver modelos de negócios orientados por dados baseados em produtos inteligentes</li> <li>• Continuar a expandir as habilidades da força de trabalho para a Indústria 4.0</li> <li>• Criar uma nova estrutura legal</li> <li>• Assegurar a proteção dos dados</li> </ul>

As novas tecnologias não devem representar perigo para as pessoas, para os demais ativos que as cercam, para o meio ambiente, nem para elas mesmas. Os desafios nesse contexto envolvem confiabilidade e disponibilidade dos sistemas ciber-físicos, e a segurança operacional dos mesmos. Também é importante serem destacados os desafios nas áreas de cibersegurança e espionagem industrial, pois o aumento do número de equipamentos e produtos conectados, tendem a gerar maior vulnerabilidade das informações trocadas entre eles. Assim, as regulações da propriedade intelectual, e os mecanismos de proteção de dados (prevenção de ataques externos, acesso não autorizados, vírus) serão cada vez mais requisitados e exigirão melhores protocolos de confidencialidade. Devido à grande variedade de desafios relacionados à segurança e proteção no contexto da Indústria 4.0, e da integração entre diversos agentes em uma cadeia de valor, será necessário que os mesmos tenham um alto nível de confiança e segurança nas competências, e que demonstrem esta competência através da troca de informações, para prevenir e corrigir as falhas e aumentarem a robustez dos processos de negócios. O grupo de trabalho da *Plattform Industrie 4.0*, em conjunto com especialistas, produziu uma lista de oito áreas de prioridade para ações no campo da segurança e proteção (Kagermann et al., 2013).:

- 1) Estratégias de segurança e proteção, arquiteturas e normas;
- 2) Identificadores únicos e seguros para produtos, processos e equipamentos;
- 3) Estratégia de migração da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0;
- 4) Soluções amigáveis e seguras para os usuários;
- 5) Consideração da segurança e proteção no contexto de gestão de negócios;
- 6) Proteção segura contra pirataria de produtos;
- 7) Treinamento e desenvolvimento profissional contínuo;
- 8) Construção de uma comunidade para a proteção de dados na Indústria 4.0.

Com os desenvolvimentos da Indústria 4.0, são previstas diferentes mudanças nos sistemas de manufatura. Estes desenvolvimentos possuem não apenas implicações tecnológicas, mas também implicações na versatilidade das organizações. Como resultado, é esperada uma mudança da orientação de produto para uma orientação produto-serviço, mesmo em setores tradicionais da indústria (Lasi et al., 2014). Xu et al. (2014) destacam que as tendências de pesquisa nessa área se concentrarão nas seguintes temáticas:

- Desenvolvimento de tecnologias sustentáveis relacionadas à internet das coisas;
- Desenvolvimento de sistemas intermediários (Middleware Solutions) inteligentes;
- Emprego de técnicas de inteligência artificial para criar objetos inteligentes;
- Combinação da internet das coisas com computação em nuvem.

L. Wang et al. (2015) descrevem um exemplo de mudança disruptiva nos processos industriais, que é a realização de operações por robôs, guiadas por modelos virtuais 3D e comandadas remotamente em um ambiente virtual. Nestas operações, um operador humano remoto pode manipular um robô físico à distância, através de *softwares* específicos. São usados modelos 3D que simulam as peças reais, para guiar o operador durante uma operação em tempo real. Os modelos das peças são construídos através da captura de imagens pelo próprio robô e transmitidas para o *software*, que faz a integração do modelo virtual da peça com o modelo virtual da célula de produção, através de modelos cinemáticos de construção (*kinematic*

*models*). O robô trabalha como um manipulador, imitando os movimentos do operador à distância. No exemplo apresentado, o operador realiza operações de montagem de peças virtuais (modelos 3D), enquanto o robô imita o operador virtual e monta as peças reais simultaneamente. Estas tecnologias e outras em estudo, possibilitam as operações no mundo físico a partir do mundo virtual, e pavimentam o caminho para as fábricas do futuro. Algumas direções de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas a manufatura são sugeridas por L. Wang et al. (2015):

- **Manufatura auto-organizável:** a auto-organização está relacionada a redes de sensores inteligentes e tecnologias adaptativas, e depende do nível de capacidade de comunicação e cognição entre equipamentos de produção e dispositivos de controle. Sistemas multiagentes com processamentos autônomos (*multi-agent systems*), combinados com sistemas ciber-físicos para comunicação e execução são componentes importantes para uma manufatura auto-organizável. As pesquisas nesta área lidam com questões do tipo: quais informações devem ser transferidas, como elas são usadas, e qual o nível de incerteza está presente. Mecanismos de controle orientados por eventos, embutidos em sensores e atuadores integrados a sistemas em nuvem, são as bases para as pesquisas e desenvolvimento de sistemas de autoaprendizado e auto-organização.

- **Computação sensível ao contexto e computação consciente:** sistemas de controle sensíveis ao contexto, baseados em comunicação com sensores e atuadores, são possibilitados por sistemas ciber-físicos. Códigos de programação nativos de máquinas e robôs, complexos e falíveis, que são atualmente realizados por humanos, serão substituídos por algoritmos inteligentes e descentralizados, executáveis em controladores de máquinas para um controle robusto e adaptativo. As pesquisas nessa área incluem circuitos fechados de análise de dados, desenvolvimento de algoritmos inteligentes, interfaces de dispositivos controladores e novos projetos de controladores inteligentes, com capacidade de comunicação e execução de algoritmos.

- **Colaboração homem-máquina:** a colaboração entre homens e máquinas irá aumentar a produtividade e a eficiência no uso de recursos, pela combinação da flexibilidade dos humanos e pela precisão das máquinas. Humanos podem instruir robôs pela fala, por sinais, gestos e pela combinação destes, em colaboração nos processos produtivos. Por outro lado, humanos poderão ser auxiliados por sistemas ciber-físicos, como por exemplo óculos de realidade virtual e aumentada. A padronização é mais um esforço requerido para tornar a colaboração entre humanos e robôs numa realidade nas fábricas do futuro.

Por fim, outro desafio que se apresenta às empresas, seja em projetos de atualização tecnológica ou mesmo de novos projetos de instalações industriais, e que está ligado aos objetivos deste trabalho, é avaliarem o grau de maturidade do negócio na implementação desses projetos. Ou seja, se a empresa dispõe dos conhecimentos do mercado, dos concorrentes, e principalmente das tecnologias disponíveis, que permitam o aumento da competitividade, com relação a custos, qualidade, prazo, flexibilidade e diferenciação. Nesse desafio se concentra o capítulo 3 deste trabalho, com o desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade, que possa ser utilizado por profissionais e pesquisadores, para avaliarem se as empresas estão caminhando no sentido da evolução tecnológica, e quanto a adoção ou não destas tecnologias impactam o negócio.

## 2.6. Análise de modelos de avaliação de maturidade da Indústria 4.0

Um modelo de maturidade pode ser definido como uma estrutura conceitual, constituído por partes que definem a maturidade, ou estado de desenvolvimento, de uma determinada área de interesse, e em alguns casos identifica e descreve processos que uma organização precisa desenvolver para atingir um determinado cenário futuro desejado. Modelos de maturidade são usados normalmente como instrumentos para conceituar e medir o nível de maturidade de uma empresa, ou de um processo relacionado a um estado ou objetivo futuro. São baseados nas premissas de que as pessoas, as organizações, áreas funcionais, e os processos, evoluem através de um processo de desenvolvimento, ou de crescimento, na direção de uma maturidade mais avançada, através de um determinado número de níveis. Um nível no modelo é a base sobre a qual uma evolução para um nível maior de maturidade pode ser planejada e implementada. O objetivo dos modelos de maturidade é quantificar as atividades realizadas, torná-las mensuráveis e fazê-las maduras ao longo do tempo.

Modelos de maturidade refletem aspectos da realidade para classificar capacidades de determinados domínios de interesse, que podem ser usados para análises, comparações com competidores, e comparações com as referências naquele domínio (*benchmarking*). Estes modelos tipicamente contemplam dimensões e níveis. O conteúdo de cada dimensão pode ser derivado de métodos qualitativos de pesquisa, incluindo estudos de caso, grupos focais, e outras metodologias de geração de ideias e tomada de decisão, como o método *Delphi* (Donovan, Sullivan, & Bruton, 2016). Os níveis são rótulos ordinais que significam estágios de maturidade, enquanto as dimensões representam capacidades específicas do domínio de interesse. Um nível de maturidade consiste na consolidação de práticas gerais e específicas relacionadas a um conjunto de processos predefinidos que aumentam a performance geral de uma empresa, ou de um objetivo específico (De Souza & Gomes, 2015).

Modelos de maturidade geralmente são limitados em medir um aspecto particular de um domínio de conhecimento, apesar de múltiplos modelos poderem ser combinados em uma mesma avaliação. No entanto, combinar vários modelos pode ser desafiador quando existem diferentes dimensões e níveis de maturidade. As críticas mais comuns a modelos de maturidade incluem acurácia insuficiente, documentação pobre, fundamentação teórica inadequada, e abordagens tendenciosas no escopo do modelo, mesmo quando existem métodos empíricos (Donovan et al., 2016).

Em alguns casos, ao invés de desenvolverem seus próprios modelos de maturidade, as organizações utilizam modelos concebidos por instituições especializadas em determinados domínios de conhecimento, como gerenciamento de projetos, desenvolvimento de *software*, ou de padronização, como por exemplo COBIT, ITIL, PMI, CMMI, ISO. Modelos prontos possuem algumas vantagens e também algumas desvantagens (Goksen, Cevik, & Avunduk, 2015).

As principais vantagens:

- Prontos para o uso, não sendo necessário gastar tempo e pensar sobre a concepção e desenvolvimento do modelo;

- Já foram testados, usados por outras instituições e pessoal especializado;
- Ele continua a ser desenvolvido, com muitas pessoas e instituições que os utilizam e contribuem para o seu aperfeiçoamento.

As principais desvantagens:

- Existem modelos com escopos que atendem somente parcialmente à necessidade. Ele foi desenvolvido a partir de uma determinada disciplina;
- Parecem ser generalistas e não mostram o verdadeiro dinamismo da instituição que deseja aplicá-lo;
- Eles são únicos e têm que ser usados na própria forma como foram construídos, por isso não são flexíveis.

A transformação para a Indústria 4.0 envolve um aumento significativo das competências digitais na manufatura, e provoca mudanças ao longo de toda a organização. Considerando a alta complexidade desta transformação, é esperado que ela leve muitos anos, e deve ser planejada e implementada de modo a garantir impactos positivos na lucratividade, por exemplo através de ganhos de eficiência, e deve ocorrer em etapas incrementais. Pode não ser exatamente sincronizada em todos os processos de negócio, todas as plantas industriais, linhas de produção, ou mesmo em todas células de produção em uma unidade. Fica a critério de cada empresa decidir qual estágio de desenvolvimento que representa um bom equilíbrio entre os custos e os benefícios da mudança, de acordo com as circunstâncias que envolvem o negócio, com a visão de um estado futuro desejado ao final do processo de transformação (Schuh et al., 2017).

Antes de engajarem-se em projetos ou atividades de transformação, as empresas de manufatura precisam reconhecer o estado atual de aderência aos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, através de uma análise sistemática e estratégica, que envolva não somente o desempenho da empresa em si, mas de todas as partes envolvidas no negócio, tais como fornecedores, clientes e investidores.

A partir da pesquisa bibliográfica, foram estudados alguns modelos de maturidade da Indústria 4.0, com objetivo de conhecer o que existe na literatura, e para fundamentar o desenvolvimento de um novo modelo, que contemple as melhores práticas de outros.

#### **2.6.1. Guia de avaliação de maturidade da Acatech**

O Guia de maturidade da Indústria 4.0 (Schuh et al., 2017), elaborado pela Acatech (*National Academy of Science and Engineering*), que é a Academia Nacional de Ciências e Engenharia, da Alemanha, pode ser considerado um modelo de avaliação de maturidade em si, mas também um guia para que as empresas compreendam o caminho que devem seguir para o desenvolvimento da Indústria 4.0, e construam seus próprios modelos. Ele provê às empresas de manufatura um guia para elas criarem seus próprios caminhos no sentido de se tornarem empresas abertas ao aprendizado e ágeis nas respostas e na adaptação, e também para auxiliar na criação de medidas que entreguem benefícios concretos. Ele ajuda as empresas a determinarem em qual estágio elas estão atualmente no processo de transformação, a partir de perspectivas tecnológicas, organizacionais e culturais. Apesar de as tecnologias avançadas

tornarem possível o acesso a um amplo leque de dados, a habilidade de desenvolver o potencial de transformação desses dados depende de cada empresa, de acordo com sua cultura e estrutura organizacional. Os principais desafios para os negócios incluem o entendimento do significado da Indústria 4.0 para eles, e o desenvolvimento sistemático de implementação de estratégias de resposta (Schuh et al., 2017).

O guia sugere seis estágios para o desenvolvimento do processo de transformação:

**1) Informatização:** provê a base para digitalização. Ainda que com sistemas operando de forma isolada, a informatização se encontra bem avançada em muitas empresas, e é usada para execução de tarefas repetitivas de maneira mais eficiente. A informatização entrega benefícios, possibilitando uma produção mais barata, e um grau de precisão, sem o qual não seria possível a produção de muitos dos produtos modernos atuais. Importantes exemplos desse estágio são as máquinas CNC não integradas a sistemas CAD, ou mesmo sistemas de execução de manufatura (MES), e outros sistemas de aplicação não integrados ao ERP. Outro exemplo são testes de qualidade não vinculados às ordens de produção, o que leva a maior esforço na rastreabilidade de problemas de qualidade ocorrerem em quais ordens.

**2) Conectividade:** no estágio de conectividade, os sistemas de negócios informatizados são atualizados ou substituídos por sistemas conectados. Parte dos sistemas operacionais permitem a conectividade e interoperabilidade, mas a integração completa dos sistemas de informação e sistemas de operação ainda não está implantada.

**3) Visibilidade:** este estágio é dedicado a prover visibilidade de informações, obtidas através do sensoriamento e aquisição de dados, não se restringindo somente aos dados da produção, mas de toda a organização, e disponibilizados para os envolvidos ao longo da cadeia de valor, em uma grande coleção de dados (*Big Data*), através da integração dos sistemas de planejamento de recursos (ERP), sistemas de gestão do ciclo de vida do produto (PLM), e sistemas de execução de manufatura (MES). Possibilita que os gerentes tomem decisões baseadas em dados, que é uma evolução se comparada a decisões baseadas em experiência. Este é um importante conceito para suportar os próximos estágios.

**4) Transparência:** após a criação de uma estrutura digital, no estágio anterior, este estágio compreende o entendimento dos dados, e consequentemente dos problemas, passando a entender porque eventos passados e presentes ocorreram ou estão ocorrendo, em meio aos complexos sistemas que foram implementados. Busca a geração de conhecimento, através da sistematização da análise das informações, a identificação da causa raiz dos problemas, e cria padrões de ação para a rápida resolução dos mesmos. São característicos neste estágio sistemas de mineração de dados (*Data Mining*) e *softwares* aplicados de simulação e análise probabilística. Esta transparência pode ser usada para o monitoramento de máquinas e equipamentos, da linha de produção, sistemas logísticos, monitoramento de inventários, além de informações de vendas, pedidos, e outras informações relevantes ao negócio.

**5) Capacidade preditiva:** após atingir este estágio, a empresa será capaz de simular diferentes cenários futuros e identificar com mais clareza e precisão os mais prováveis. Essa maior previsibilidade pode ser explorada para automação dos processos de resposta, por exemplo como antecipação a paradas de produção, ruptura de estoque, atrasos nas entregas de pedidos, variações de demanda, entre outras que podem afetar eficiência e a lucratividade. Os

requisitos para a capacidade de predição são algoritmos probabilísticos inteligentes de raciocínio baseado em casos (CBR – *case-based reasoning*), e da capacidade de identificar eventos que requerem decisões, que neste estágio ainda são tomadas por humanos.

**6) Adaptabilidade:** uma vez atingida a capacidade preditiva, a adaptação contínua permite à empresa delegar as ações a sistemas de informação e comunicação em conjunto com sistemas de operação, obtendo maior velocidade de resposta a situações de mudança. O grau de adaptabilidade depende da complexidade da decisão e do custo/benefício para sua implementação, além dos riscos de uma decisão automatizada, e como ela pode afetar a relação com os clientes e com fornecedores. O atingimento da adaptabilidade ocorre quando a empresa é capaz de usar dados do modelo digital para tomar decisões que possibilitem os melhores resultados em menores espaços de tempo possíveis, e implementar as ações de resposta de forma automática, com pouca ou nenhuma intervenção humana.

A Figura 2 abaixo ilustra os níveis de maturidade descritos acima, no caminho de transformação digital rumo a Indústria 4.0.

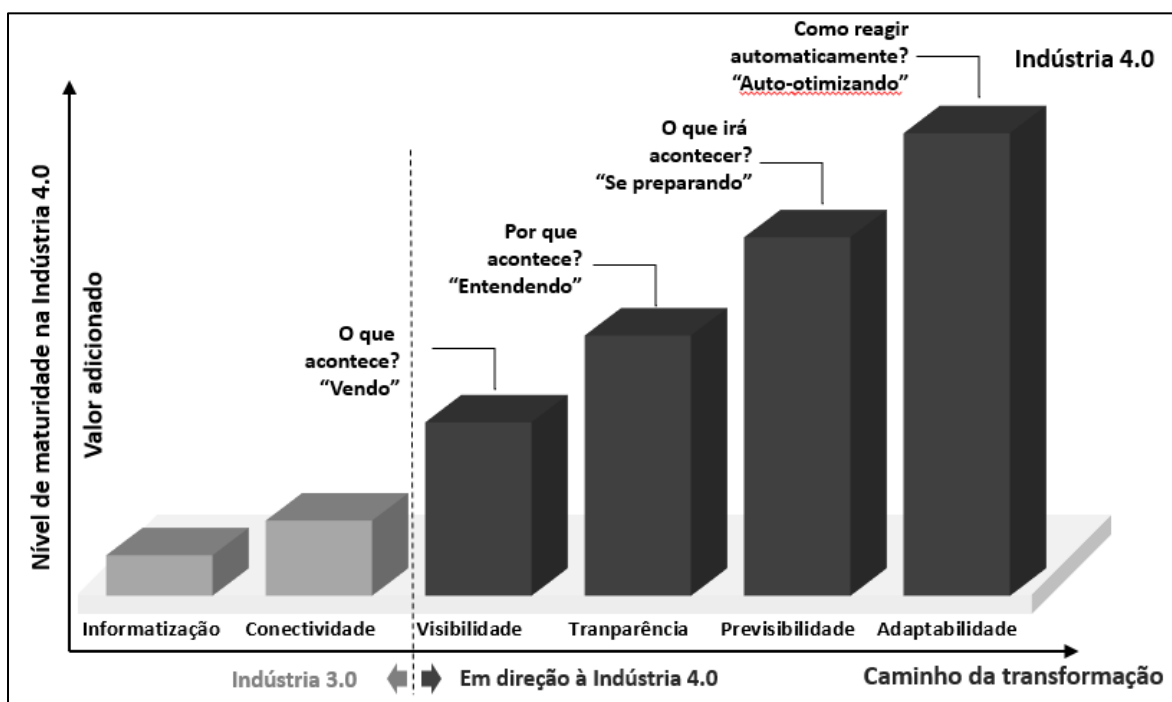


Figura 2 - Níveis de maturidade na transformação para a Indústria 4.0 - adaptado de Schuh et al. (2017)

Os quatro últimos estágios são mais inovadores e complexos, e mais diretamente relacionados aos benefícios da Indústria 4.0. Nenhum deles pode ser pulado, pois o atingimento de um nível de maturidade suporta os níveis que o sucedem, de forma que são interdependentes.

O guia define quatro áreas estruturais, sendo elas: os recursos, os sistemas de informação, a estrutura organizacional, e a cultura organizacional. Em cada área estrutural estão contidos dois princípios fundamentais, e cada princípio possui as respectivas capacidades requeridas de transformação. As áreas estruturais, seus respectivos princípios e capacidades de transformação, estão descritos na Tabela 4 abaixo:



Tabela 4 - Áreas estruturais, princípios e capacidades de transformação (Schuh et al., 2017)

ÁREA ESTRUTURAL	PRINCÍPIO FUNDAMENTAL	CAPACIDADES DE TRANSFORMAÇÃO
<b>1 - RECURSOS</b>	Capacidade digital	Prover competências digitais
		Aquisição automatizada de dados através de sensores e atuadores
		Processamento descentralizado de dados através de sistemas embarcados
	Comunicação estruturada	Comunicação eficiente
		Projeto de interfaces baseado em tarefas
<b>2 - SISTEMAS DE INFORMAÇÃO</b>	Auto aprendizado no processamento de informação	Análise automatizada de dados
		Entrega de informação contextualizada
		Interfaces adaptadas às tarefas específicas
		Construir uma infraestrutura de TIC resiliente e implementar armazenagem de dados baseada no contexto
	Integração dos sistemas de informação	Integrar os sistemas de informação de forma vertical e horizontal
		Padronizar as interfaces de dados
		Implementar governança de dados
		Atualizar e aumentar a proteção de dados
<b>3 - ESTRUTURA ORGANIZACIONAL</b>	Organização interna orgânica	Grupos de trabalho flexíveis
		Gerenciamento sobre os níveis de autonomia de decisões
		Sistema de metas motivadoras
		Gerenciamento ágil
	Colaboração dinâmica ao longo da cadeia de valor	Foco nos benefícios ao cliente
		Cooperação na rede de valor
<b>4 - CULTURA ORGANIZACIONAL</b>	Abertura para mudança	Reconhecer o valor dos erros
		Abertura para inovação
		Aprendizado baseado em dados e tomada de decisão
		Desenvolvimento profissional contínuo
		Responsividade à mudança
	Colaboração social	Estilo de liderança democrático
		Comunicação aberta
		Confiança nos processos e nos sistemas de informação

O grau de maturidade na Indústria 4.0 de uma empresa baseia-se na sua capacidade global de mudança e adaptação. Então, os seis estágios são refletidos nas quatro perspectivas

acima mencionadas. Para que as transformações esperadas na empresa sejam realizadas de forma holística, um determinado nível de maturidade só é atingido quando todas as quatro perspectivas atingirem este nível. Só assim, pode-se considerar que a assimilação e implementação de medidas são extensivas a toda organização. Por exemplo, ainda que os sistemas de informação estejam maduros na capacidade preditiva, a estrutura organizacional precisa ser habilitada para a execução das decisões derivadas das previsões, em ações que garantam o sucesso na implementação da solução.

A Figura 3 representa o modelo de avaliação proposto pelo guia, onde cada área estrutural (recursos, sistemas de informação, estrutura organizacional, cultura organizacional) é avaliada com relação aos seis estágios possíveis de maturidade.

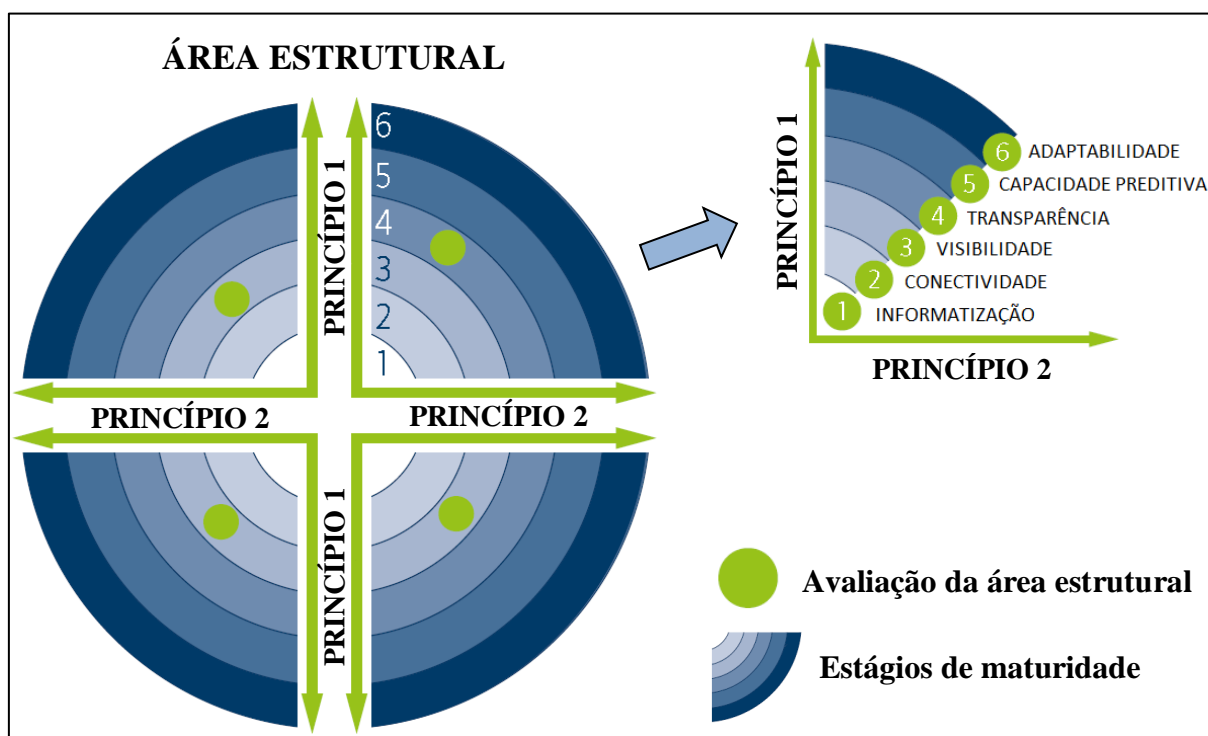


Figura 3 – Avaliação da maturidade das áreas estruturais - adaptado de Schuh et al. (2017)

O guia de maturidade é por si só uma ferramenta prática de aplicação, mas também uma referência para a elaboração de modelos de avaliação de maturidade. Ele provê os fundamentos teóricos para que demais organizações, seja do setor industrial ou de serviços de consultoria, desenvolvam ferramentas adequadas à suas realidades e mercados de atuação. A utilização do guia compreende uma abordagem em três fases. A primeira é a identificação do estágio atual de maturidade nas diferentes áreas estruturais, através de questionário que relaciona as capacidades de transformação de cada área estrutural a um determinado nível de maturidade. A segunda fase é a definição por parte da organização do estágio de maturidade que ela pretende atingir ao final do processo de transformação, baseada na estratégia corporativa. Assim, ela é capaz de analisar o *gap* existente entre a sua situação atual e os objetivos perseguidos, assim como as capacidades necessárias para a obtenção da maturidade desejada. E a terceira fase envolve a definição de ações para prover as capacidades necessárias, e a incorporação das mesmas em um mapa estratégico da Indústria 4.0.

### 2.6.2. Modelo de avaliação de maturidade de adaptação de empresas de manufatura à Indústria 4.0 de Schumacher et al. (2016)

Com base em experiências de *workshops* de orientação estratégica com diversas empresas, Schumacher et al. (2016) afirmam que as empresas têm sérios problemas em captar holisticamente a ideia da Indústria 4.0 e os conceitos e aplicações derivados dela. Por um lado, elas não são capazes de relacionar estrategicamente os benefícios da Indústria 4.0 ao seu negócio, e por outro, elas se deparam com problemas em determinar o seu atual estado de desenvolvimento relacionado à visão da Indústria 4.0. Desta forma, as empresas falham em identificar áreas concretas e o caminho correto para o desenvolvimento de ações, programas e projetos. Então, para suprir as incertezas e as necessidades das empresas de manufatura, com relação às transformações da Indústria 4.0, novos métodos e ferramentas são necessários para prover um guia e o suporte para o alinhamento das estratégias de negócios e operações com as novas tecnologias emergentes.

Schumacher et al. (2016) desenvolveram um modelo de avaliação de maturidade, baseado nas recomendações do relatório final da *Plattform Industrie 4.0*, e em artigos científicos, estudos e relatórios, e na experiência acumulada nos *workshops* com empresas. Foram definidos um total de 62 itens de avaliação de maturidade, agrupados em 9 dimensões organizacionais. Seguiu-se uma fase de transformação do modelo em uma ferramenta útil e de uma forma adequada de distribuição. Posteriormente, o modelo foi aplicado em duas empresas industriais para validação, e coleta de sugestões de melhorias. As dimensões organizacionais e alguns exemplos de itens de avaliação do modelo, que estão disponíveis no artigo consultado, estão descritos na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Itens de avaliação de maturidade propostos por Schumacher et al. (2016)

DIMENSÕES	ITENS DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE
<b>Estratégia</b>	Mapa estratégico para a implementação da Indústria 4.0
	Disponibilidade de recursos para a realização das ações
	Adaptação do modelo de negócios existente para a Indústria 4.0
	Comunicação e documentação das atividades da Indústria 4.0
	Compatibilidade da Indústria 4.0 com a estratégia corporativa
	Existência de estratégia para a transformação digital
<b>Liderança</b>	Preparação das lideranças
	Competências e métodos de gestão
	Existência de coordenação central para a Indústria 4.0
<b>Clientes</b>	Utilização de dados sobre os clientes
	Digitalização das vendas e dos serviços
	Organização digital de informações de clientes
<b>Produtos</b>	Individualização de produtos
	Digitalização de produtos
	Integração dos produtos em outros sistemas
	Flexibilidade das características dos produtos

DIMENSÕES	ITENS DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE
<b>Operações</b>	Descentralização de processos
	Modelagem e simulação
	Interdisciplinaridade
	Colaboração interdepartamental
<b>Cultura</b>	Compartilhamento do conhecimento
	Abertura a inovação e colaboração entre empresas
	Valor das tecnologias de informação e comunicação na empresa
<b>Pessoas</b>	Competências dos empregados em tecnologias de informação e comunicação
	Abertura dos empregados para novas tecnologias
	Autonomia dos empregados
<b>Governança</b>	Regras trabalhistas para a Indústria 4.0
	Adequabilidade de padrões tecnológicos
	Proteção de propriedade intelectual
<b>Tecnologia</b>	Existências de modernas tecnologias de informação e comunicação
	Utilização de dispositivos móveis
	Utilização de comunicação máquina-máquina (M2M)

Cada item de avaliação acima é avaliado de acordo com 5 níveis de maturidade, onde o mais baixo (nível 1) representa a completa falta de atributos que suportam os conceitos da Indústria 4.0, e o nível mais alto (nível 5) representa o estado da arte dos atributos requeridos. As avaliações são resumidas em um processo de 3 etapas:

- 1) Medição dos itens de maturidade nas empresas via questionários
- 2) Cálculo do nível de maturidade em cada uma das 9 dimensões, auxiliado por *software*
- 3) Representação visual do nível de maturidade via relatórios de maturidade e gráficos radar

Schumacher et al. (2016) destacam que para a aplicação do questionário nas empresas, é necessário que o entrevistado possua um bom entendimento dos conceitos da Indústria 4.0. Para maior acurácia e representatividade da avaliação, podem ser realizadas apresentações e reuniões de nivelamento com os entrevistados.

Para o cálculo do nível de maturidade de cada dimensão, são feitas médias ponderadas dos resultados obtidos em cada item de avaliação multiplicado pelo respectivo fator de ponderação. E analogamente, para a determinação do nível de maturidade global da empresa, são feitas médias ponderadas dos níveis de maturidade calculados de cada dimensão multiplicados pelo fator de ponderação de cada dimensão.

De acordo com o estudo de caso da avaliação de maturidade com relação a transformação para a Indústria 4.0, realizado em uma empresa austríaca fornecedora de peças para o setor de aviação, a Figura 4 abaixo representa os resultados da avaliação de maturidade da empresa como um todo. A empresa foi escolhida, pelo fato de estar engajada na

transformação para a Indústria 4.0 e possuir os conhecimentos niveladores para a aplicação do questionário.

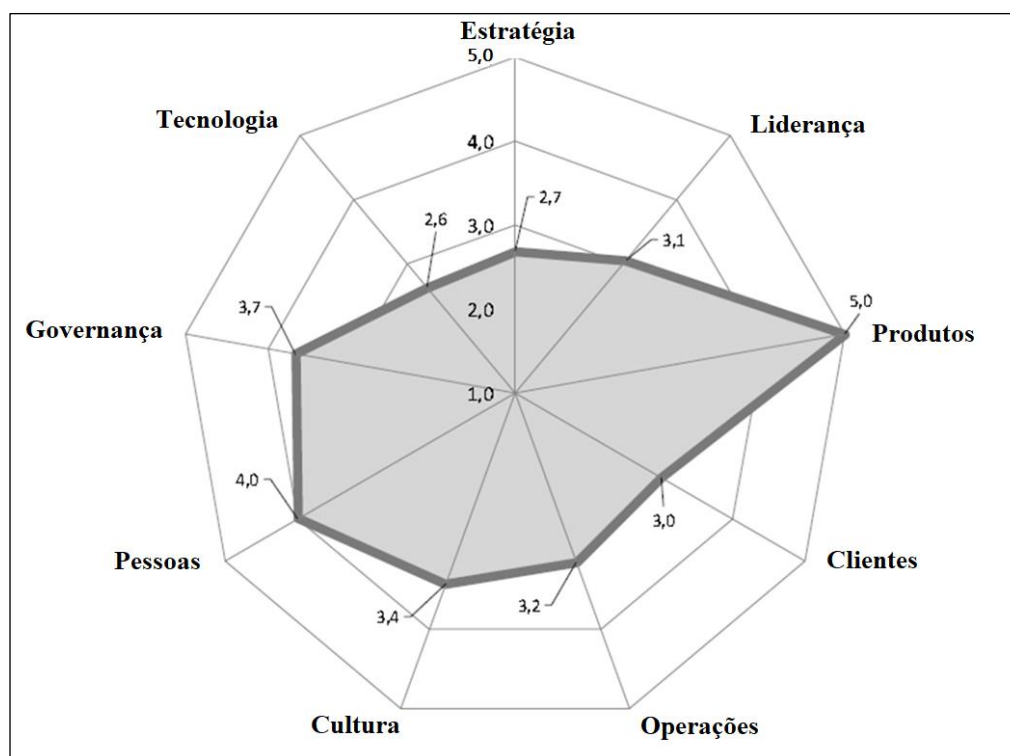


Figura 4 - Resultado da avaliação de maturidade uma empresa austríaca do setor de aviação – adaptado de Schumacher et al. (2016)

### 2.6.3. Modelo IMPULS-VDMA – Autoavaliação de preparação de empresas para a Indústria 4.0

A Associação de Fabricantes de Máquinas da Alemanha (VDMA), através da Fundação IMPULS, e auxiliada por empresas representativas do setor industrial alemão, e por instituições de pesquisa como a *IW Consult*, uma subsidiária do *Cologne Institute for Economic Research*, e pelo *Institute for Industrial Management (FIR)*, pertencente a *RWTH Aachen University*, ambos na Alemanha, realizou um estudo acerca da preparação das empresas para a transformação na Indústria 4.0, e construiu uma ferramenta online para que as empresas possam se auto avaliar. É pretendido que esta ferramenta traga a visão maior dos conceitos, para apoiar mais de perto a realidade dos negócios. Ela realça os marcos desafiadores que as empresas precisam transpor para continuar no caminho da transformação para a Indústria 4.0. O estudo realizado traz as definições da Indústria 4.0 e a resume de forma que as empresas obtenham um conjunto de quatro capacidades implementadas, indicados pelas próprias empresas: fábricas inteligentes, produtos inteligentes, operações inteligentes, e serviços baseados no uso de dados.

Esta ferramenta é um modelo de avaliação de maturidade composto por seis dimensões de agrupamento, que contemplam 18 áreas de interesse distribuídas nas dimensões, que são os fundamentos do modelo de avaliação. Quatro das seis dimensões definidas coincidem com as capacidades descritas acima (fábricas inteligentes, produtos inteligentes, operações inteligentes, e serviços baseados no uso de dados), e o grupo de trabalho identificou mais duas dimensões para compor o modelo: “estratégia e organização”, e “força de trabalho”. Os autores consideram

a Indústria 4.0 uma questão estratégica, por isso merecem atenção avaliações que envolvam os objetivos estratégicos, a disponibilidade de recursos, a gestão da inovação, e capacidade de gestão da alta administração das empresas para os desafios ao longo do caminho de transformação. São apresentadas na Tabela 6 abaixo as dimensões previstas no modelo e suas respectivas capacidades de transformação (Lichtblau et al., 2015):

*Tabela 6 – Capacidades de transformação propostas por Lichtblau et al. (2015)*

DIMENSÕES	CAPACIDADES DE TRANSFORMAÇÃO
<b>Estratégia e organização</b>	Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0
	Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0
	Gestão da inovação e uso de tecnologia
<b>Fábricas inteligentes</b>	Modelagem digital
	Infraestrutura de equipamentos
	Uso de dados
	Sistemas de Informação
<b>Operações inteligentes</b>	Uso da nuvem
	Segurança das tecnologias de informação
	Processos autônomos
	Partilha de informações
<b>Produtos inteligentes</b>	Softwares embarcados nos produtos
	Análise de dados durante a fase de utilização do produto
<b>Serviços derivados de dados coletados</b>	Disponibilidade de serviços baseados em dados coletados
	Proporção de receitas derivadas de serviços baseados em dados coletados
	Proporção de dados utilizados na fase de uso do produto
<b>Força de trabalho</b>	Aquisição de habilidades
	Habilidades existentes da força de trabalho

As dimensões são usadas para desenvolver um modelo de seis níveis de maturidade (*Outsider, Beginner, Intermediate, Experienced, Expert, e Top Performer*), e para medir a preparação da empresa na Indústria 4.0.

Cada um dos seis níveis (descritos de 0 a 5) inclui os requisitos mínimos que devem ser identificados e encontrados para preencher completamente o respectivo nível. O nível “0” – *outsiders* – são considerados fora do conceito da Indústria 4.0, ou seja, empresas que não fizeram nada ou muito pouco, para planejar e implementarem medidas da Indústria 4.0. O nível “5” representa os *top performers*, que são as empresas que implementaram com sucesso todas as medidas e atenderam todos os requisitos da Indústria 4.0, descritos no modelo. O nível de maturidade de uma determinada dimensão é definido pelo menor nível de maturidade das respectivas áreas de interesse que a compõem. Se por exemplo em uma dimensão, uma área de interesse tiver um nível de maturidade 1 e as demais áreas de interesse tiverem nível de maturidade 4, o nível de maturidade da dimensão será 1, pois entende-se que a empresa precisa preencher completamente os requisitos de cada dimensão de maneira que os desenvolvimentos

das áreas de interesse caminhem de forma aproximadamente em paralelo, denotando uma sintonia e compatibilização das ações pertinentes a cada dimensão.

Cada dimensão do modelo possui seus próprios requisitos, mas os seis níveis são apresentados abaixo de forma mais abrangente e caracterizam o nível de maturidade atribuído a empresa como um todo:

- **Nível 0 - *Outsider*:** uma empresa neste nível não possui nenhum dos requisitos. Este nível é automaticamente atribuído a empresas para as quais a Indústria 4.0 é desconhecida ou declarada irrelevante.

- **Nível 1 - *Beginner*:** a empresa está envolvida na Indústria 4.0 através de iniciativas piloto. Apenas alguns dos processos produtivos são suportados por TIC, o que satisfaz apenas parcialmente as necessidades futuras de integração e comunicação. Sistemas integrados e partilha de informações são limitados a poucas áreas. Começa a fabricar produtos com os primeiros passos na direção de serem baseados em funcionalidades de TIC. As capacidades para expandir a Indústria 4.0 são encontradas em apenas algumas áreas da empresa.

- **Nível 2 - *Intermediate*:** incorpora a Indústria 4.0 na sua orientação estratégica e desenvolve indicadores adequados para medir o *status* da implementação. Investimentos relevantes são feitos em algumas poucas áreas. Alguns dados de produção são automaticamente coletados e utilizados de forma limitada. A infraestrutura de equipamentos não satisfaz todos os requisitos para expansões futuras. Fabrica produtos com as primeiras funcionalidades de TIC embarcadas. Em algumas áreas, os funcionários possuem as habilidades necessárias para expandir a Indústria 4.0.

- **Nível 3 - *Experienced*:** já formulou uma estratégia para Indústria 4.0 e promove investimentos relacionados a Indústria 4.0 em diversas áreas e orientados por um departamento de gestão da inovação. Os sistemas de TIC, incluindo soluções em nuvem, suportam os processos de produção, com os dados das principais áreas coletados automaticamente. Soluções de segurança das informações foram implantadas. Fabrica produtos com diversas funcionalidades de TIC embarcadas, que formam a base para os primeiros serviços orientados por dados. Grandes esforços sendo feitos para aumentar as habilidades dos empregados para responderem aos novos desafios.

- **Nível 4 - *Expert*:** monitora estratégia para a Indústria 4.0 com indicadores apropriados. Investimentos são feitos em todas as áreas relevantes e os processos são suportados pela gestão da inovação interdepartamental. Os produtos em processo e os produtos acabados possuem funcionalidades baseadas em TIC embarcadas que possibilitam a comunicação com os clientes, permitindo a coleta e a análise de dados durante a fase de uso dos produtos. Na maioria das áreas relevantes, a empresa possui as capacidades necessárias para atingir este nível de maturidade e expandir futuramente a Indústria 4.0.

- **Nível 5 - *Top Performer*:** tem implantada uma estratégia para a indústria 4.0, suportada por investimentos por toda a empresa. Soluções abrangentes de segurança estão implementadas, e soluções baseadas na nuvem entregam uma infraestrutura de TIC flexível, que suporta os processos de produção. Algumas áreas da produção já usam equipamentos guiados autonomamente e possuem processos autonomamente reativos. Os dados coletados na fase de uso dos produtos são utilizados para atividades como desenvolvimento de produtos, manutenção remota, e suporte a vendas. Serviços aos clientes orientados por dados colaboram

para uma parcela significativa das receitas. Possui as capacidades técnicas e habilidades dentro da organização para seguir adiante com os projetos da Indústria 4.0.

De acordo com o grau de maturidade obtido na aplicação do modelo, as empresas são classificadas em três tipos: “*Newcomers*”, que são as empresas que ainda estão entrando para o caminho de transformação, as “*Learners*”, que são as empresas que já se engajaram nos primeiros passos do processo de transformação, mas que ainda estão aprendendo a implementar as técnicas e conceitos, e as “*Leaders*”, que são aquelas que já alcançaram resultados satisfatórios e servem como exemplos de implementação dos conceitos da Indústria 4.0. No estudo realizado pela Fundação IMPULS na Alemanha, de acordo com (Lichtblau et al., 2015), apenas 5,6% das empresas avaliadas estão no grupo das “*Leaders*”, outros 17,9% foram classificadas como “*Learners*”, e a grande maioria de 76,5% ainda não tomaram nenhuma ação sistematizada para implementar a Indústria 4.0, e foram classificadas como “*Newcomers*”.

A Figura 5 representa os níveis de maturidade do modelo e as respectivas classificações da empresa com relação aos resultados obtidos.

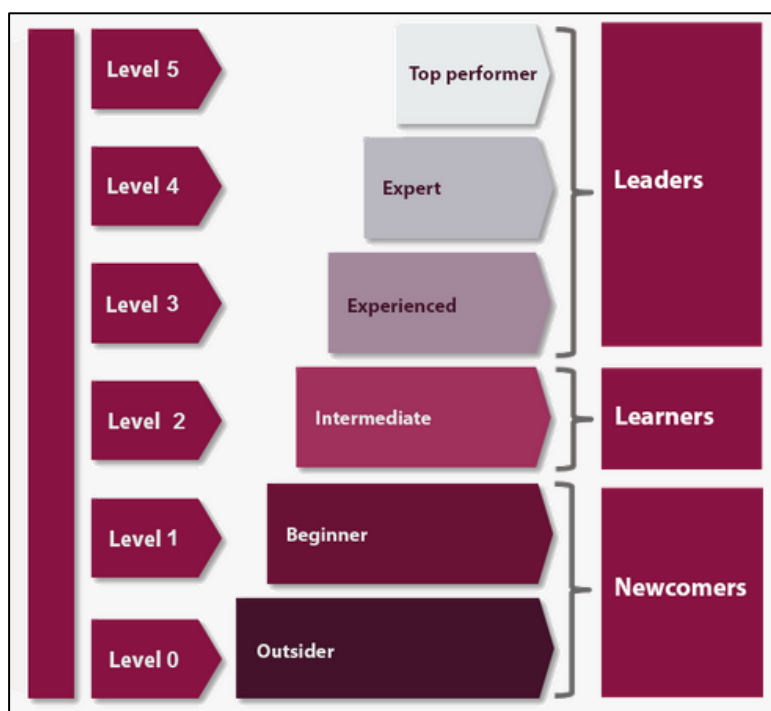


Figura 5 - Níveis de maturidade do modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 – IMPULS-VDMA – adaptado de Lichtblau et al. (2015)

O modelo pressupõe a determinação de fatores de ponderação para as dimensões, de forma que a determinação do nível de maturidade da empresa com um todo seja feita através de uma média ponderada dos níveis de maturidade de cada dimensão, multiplicados pelos respectivos fatores de ponderação. A definição dos fatores de ponderação das dimensões foi feita com base no estudo realizado com o conjunto de empresas, através de questionamentos a respeito da importância relativa que cada dimensão tinha para as empresas. Assim, a partir de amostra avaliada, considerada representativa no universo das empresas de Engenharia, foi obtido o seguinte resultado da importância relativa das dimensões, considerando um total de 100 pontos possíveis:



- Estratégia e Organização – 25%
- Fábricas inteligentes – 14%
- Produtos inteligentes – 19%
- Serviços baseados em dados – 14%
- Operações inteligentes – 10%
- Força de trabalho – 18%

As importâncias relativas identificadas no estudo acima, servem apenas como exemplo de como os fatores podem alterar a composição de futuros modelos que venham a ser criados como o mesmo propósito, e demonstram a não uniformidade de relevância de todas as dimensões. E também estas importâncias relativas podem variar, de acordo por exemplo com o setor industrial, com o grau de automação dos processos produtivos, da disponibilidade de recursos e também com os objetivos estratégicos de cada organização.

Foi desenvolvida uma ferramenta online, onde as empresas interessadas podem fazer a auto avaliação quanto à preparação e adaptação na Indústria 4.0, e permite uma comparação com as empresas líderes (*Benchmarks*), no mesmo segmento de atuação e do mesmo porte (pequenas, médias e grandes empresas. A autoavaliação *online* é constituída por diversas questões distribuídas pelas seis dimensões, e que buscam compreender o grau de entendimento e de ações de fato implantadas nas empresas, a fim de estabelecer o grau de maturidade nas dimensões e da empresa como um todo. Seguem alguns exemplos de questões presentes na autoavaliação, que devem ser respondidas com a classificação de 1 a 5 conforme os níveis de maturidade.

- Estratégia e organização: Em que extensão a Indústria 4.0 está estabelecida e implementada em sua organização?
- Fábricas inteligentes: Em que extensão a empresa possui produção automatizada e integrada de forma digital, baseada em sistemas ciber-físicos?
- Operações inteligentes: Em que extensão os processos e os produtos são modelados de forma digital e são capazes de serem controlados através de sistemas de sistemas de informação e comunicação e de algoritmos no mundo virtual?
- Produtos inteligentes: Em que extensão os produtos podem ser controlados por sistemas de informação e comunicação, permitindo que se comuniquem e interajam com outros sistemas ao longo da cadeia de valor?
- Serviços orientados por dados: Em que extensão são oferecidos serviços orientados por dados, que são possíveis somente através da integração de produtos, da produção e com os clientes?
- Força de trabalho: Em que extensão a empresa possui as habilidades que necessita para implementar os conceitos e as tecnologias da Indústria 4.0?

A partir dos fatores de ponderação e do nível de maturidade de cada dimensão, a empresa como um todo terá um nível de maturidade, também classificado de 0 a 5. Não está claro no relatório quais critérios são usados para transformar as respostas do questionário aplicado da forma semântica para um número que represente o nível de maturidade de um determinado item de avaliação. Ou seja, não estão explicitados os critérios utilizados que garantam a repetibilidade da ferramenta, e não permita distorções por conta do avaliador.

#### 2.6.4. Análise comparativa dos modelos de avaliação de maturidade pesquisados

Os modelos de maturidade analisados são todos baseados nos principais conceitos e tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, tais como os exemplificados nas seções anteriores. Em relação às tecnologias podem ser citados os CPS, a internet das coisas (IoT), a computação em nuvem, o *Big Data Analysis*, os sistemas autônomos, a comunicação entre máquinas, dentre outras. Todos os modelos analisados consideram que essas tecnologias, aplicadas ao ambiente industrial, são capazes de provocar mudanças significativas para a competitividade das empresas, e abrir novas oportunidades de negócios, gerando mudanças em toda a cadeia de valor. Pode ser verificado em todos os modelos, através dos itens de avaliação propostos, o entendimento de que um dos principais atributos da quarta revolução industrial será a integração, possibilitada e fomentada pelas tecnologias citadas acima, com especial atenção às tecnologias de informação e comunicação, e às tecnologias de operação.

De forma geral, os modelos analisados cobrem as principais áreas estruturais das empresas, contemplando os produtos, as instalações, os processos de operação e de gestão, os empregados, a cultura organizacional, os recursos tecnológicos. Todos se esforçam para avaliar os aspectos principais dos conceitos e das tecnologias da Indústria 4.0. Outros estudos e ferramentas foram pesquisadas, mas a falta de detalhamento do escopo, das questões abordadas, e dos critérios de mensuração, não permitiram uma comparação completa entre eles. Os pontos em que divergem estão ligados ao conteúdo avaliado, existindo diferenças na quantidade e descrição dos níveis de maturidade, nos componentes e subcomponentes avaliados, na profundidade e objetividade, e nos critérios de mensuração dos níveis de maturidade.

Para uma simplificação na identificação dos modelos, serão chamados adiante de:

- Modelo 1: Guia de avaliação de maturidade da Acatech de Schuh et al. (2017) – Seção 2.6.1
- Modelo 2: Modelo de avaliação de maturidade de adaptação de empresas de manufatura à Indústria 4.0 de Schumacher et al. (2016) – Seção 2.6.2
- Modelo 3: IMPULS-VDMA - Auto avaliação de preparação de empresas para a Indústria 4.0 de (Lichtblau et al., 2015) – Seção 2.6.3

Para melhor compreensão das semelhanças e diferenças dos modelos analisados, foi feito um detalhamento comparativo dos principais elementos constitutivos (dimensões, capacidades de transformação, e níveis de maturidade):

**1) Dimensões:** nos três modelos analisados, as categorias de componentes são denominadas por “Dimensões”, e assim serão denominados neste trabalho. A Tabela 7 apresenta uma comparação entre as dimensões dos modelos analisados, que foram posicionadas na tabela de forma a se observar uma correlação aproximada entre os modelos, nem sempre exata, devido às diferenças de abordagens e denominações utilizadas nos modelos.

Tabela 7 – Comparação das dimensões dos modelos analisados

MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
Estrutura Organizacional	Liderança	Estratégia e organização
	Estratégia	
Cultura Organizacional	Cultura	Força de trabalho
	Pessoas	
Recursos	Tecnologia	Fábricas inteligentes
Sistemas de Informação	Operações	Operações inteligentes
-----	Produtos	Produtos inteligentes
		Serviços derivados de dados coletados
-----	Clientes	-----
-----	Governança	-----

O modelo 1 adota três níveis hierárquicos de avaliação: as dimensões, ou áreas estruturais, os princípios fundamentais, e as capacidades de transformação. Por isso, as dimensões abrangidas no modelo 1 são resumidas em apenas quatro, o que torna a compreensão menos clara, pois há dimensões que não sumarizam muito bem as categorias de princípios fundamentais que ficam agrupados nelas. O modelo 1 por exemplo não possui nenhuma dimensão dedicada aos produtos, que são uma das principais mudanças da Indústria 4.0.

O modelo 2 é o que mais desmembrou as dimensões, sendo 9 no total, trazendo uma melhor estratificação dos assuntos abordados e melhor alocação dos subcomponentes, o que facilita o entendimento.

O modelo 3 adota seis dimensões, e pode ser observado um agrupamento se comparado às dimensões do modelo 2, onde a dimensão “Estratégia e organização” contempla duas dimensões do modelo 2 (Liderança e Estratégia) e “Força de trabalho” contempla outras duas (Cultura e Pessoas). Por isso, as dimensões do modelo 3 são quase tão abrangentes quanto às do modelo 2, com exceção das dimensões “Governança” e “Clientes”, presentes no modelo 2 e que não constam nos demais modelos. O modelo 3 também apresenta a dimensão “Serviços derivados de dados coletados”, que também não consta nos demais modelos, e está associada a oferta de serviços, com base nas informações coletadas de diversas fontes.

O emprego da tecnologia foi abordado de forma diferente nos três modelos, com o modelo 1 dando maior ênfase aos sistemas de informação, o modelo 2 trata de forma mais abrangente denominando de “Tecnologia”, e o modelo 3 aborda o tema incorporando-o nas demais dimensões e insere a dimensão “Serviços derivados de dados coletados”, trazendo uma abordagem específica para o desenvolvimento de novos serviços a partir dos dados obtidos através das tecnologias.

**2) Capacidades de transformação:** as capacidades de transformação dos modelos analisados estão agrupadas nas dimensões apresentadas acima. Possuem abordagens um pouco

distintas, qualitativamente e quantitativamente, mas todas elas tratam dos principais paradigmas de mudança da Indústria 4.0. Para um melhor entendimento das capacidades de transformação dos modelos pesquisados, foi feita uma análise comparativa das mesmas. Esta análise foi muito importante para o desenvolvimento do novo modelo, pois fornece uma visão pormenorizada das capacidades, ressaltando as semelhanças e diferenças de suas abordagens. O modelo 2 é composto por 9 dimensões, o que possibilita uma melhor estratificação dos subcomponentes, denominados pelo autor por itens de avaliação. No artigo consultado, os 62 itens de avaliação que o autor menciona existirem não estavam completamente disponíveis. Assim, a comparação só pôde ser feita com os 32 itens disponíveis, deixando uma lacuna de informações e análises.

Uma comparação possível e adequada é a estratificação das dimensões e de suas respectivas capacidades em quatro grandes aspectos: (a) aspectos comportamentais e de gestão, (b) aspectos técnicos, (c) aspectos externos à empresa, e (d) aspectos de mercado.

**(a) Aspectos comportamentais e de gestão:** o modelo 1 apresenta duas dimensões (Cultura organizacional e Estrutura organizacional) relacionadas a questões comportamentais e de gestão, que compõem uma abordagem que valoriza a organização e gestão das equipes de trabalho, e a disposição da alta administração em organizar a estrutura funcional, com objetivo de atender aos requisitos para uma gestão ágil e responsiva às mudanças de contexto. Na dimensão “Estrutura organizacional”, é dada maior ênfase na organização do trabalho, na autonomia de decisões dos empregados, na motivação, na definição de metas, na flexibilidade e polivalência das equipes, na colaboração ao longo da cadeia de valor, e na orientação ao cliente. Na dimensão “Cultura organizacional”, são valorizadas as características comportamentais desejadas para os empregados, tais como a abertura à inovação e o aprendizado contínuo, a liderança, a comunicação aberta entre as equipes e adaptação às mudanças tecnológicas.

O modelo 2 possui quatro dimensões (Cultura, Liderança, Estratégia, Pessoas) relacionadas a questões comportamentais e de gestão. A dimensão “Cultura” dá ênfase à abertura à inovação, à colaboração entre empresas e à valorização das tecnologias de informação e comunicação. Na dimensão “Liderança”, é prevista uma coordenação central para a Indústria 4.0, além de abordar a preparação e competências de gestão das lideranças. A dimensão “Estratégia” aborda questões como a compatibilização da Indústria 4.0 à estratégia corporativa, a gestão dos recursos para a efetivação das ações, e a adaptação do modelo de negócios para a Indústria 4.0. A dimensão “Pessoas” aborda as competências e abertura dos empregados nas novas tecnologias, e a autonomia deles para a tomada de decisões.

O modelo 3 apresenta duas dimensões (Estratégia e organização, e Força de trabalho) relacionadas a aspectos comportamentais e de gestão. A dimensão “Estratégia e organização” avalia questões ligadas à estratégia e às responsabilidades da alta administração na condução das ações, como a gestão estratégica da empresa focada na Indústria 4.0, a alocação de investimentos e a abertura e gestão da inovação. A dimensão “Força de trabalho” avalia as habilidades dos empregados e as divide em dois subcomponentes, as habilidades existentes e a aquisição de habilidades, através de capacitações dos empregados.

A Tabela 8 resume a comparação dos aspectos comportamentais e de gestão.

*Tabela 8 - Comparação dos aspectos comportamentais e de gestão dos subcomponentes dos modelos analisados*

MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<p>➤ <b><u>Estrutura Organizacional:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grupos de trabalho flexíveis</li> <li>▪ Gerenciamento sobre os níveis de autonomia de decisões</li> <li>▪ Sistema de metas motivadoras</li> <li>▪ Gerenciamento ágil</li> <li>▪ Foco nos benefícios ao cliente</li> <li>▪ Cooperação na rede de valor</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Estratégia:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mapa estratégico para a implementação da Indústria 4.0</li> <li>▪ Disponibilidade de recursos para a realização das ações</li> <li>▪ Adaptação do modelo de negócios existente para a Indústria 4.0</li> <li>▪ Comunicação e documentação das atividades da Indústria 4.0</li> <li>▪ Compatibilidade da Indústria 4.0 com a estratégia corporativa</li> <li>▪ Existência de estratégia para a transformação digital</li> </ul> <p>➤ <b><u>Liderança:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Preparação das lideranças</li> <li>▪ Competências e métodos de gestão</li> <li>▪ Existência de coordenação central para a Indústria 4.0</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Estratégia e organização:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0</li> <li>▪ Investimentos nas tecnologias Indústria 4.0</li> <li>▪ Gestão da Inovação e uso de tecnologia</li> </ul>
<p>➤ <b><u>Cultura Organizacional:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reconhecer o valor dos erros</li> <li>▪ Abertura para inovação</li> <li>▪ Aprendizado baseado em dados e tomada de decisão</li> <li>▪ Desenvolvimento profissional contínuo</li> <li>▪ Responsividade à mudança</li> <li>▪ Estilo de liderança democrático</li> <li>▪ Comunicação aberta</li> <li>▪ Confiança nos processos e nos sistemas de informação</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Cultura:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compartilhamento do conhecimento</li> <li>▪ Abertura a inovação e colaboração entre empresas</li> <li>▪ Valor das tecnologias de informação e comunicação na empresa</li> </ul> <p>➤ <b><u>Pessoas:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Competências dos empregados em tecnologias de informação e comunicação</li> <li>▪ Abertura dos empregados para novas tecnologias</li> <li>▪ Autonomia dos empregados</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Força de trabalho:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aquisição de habilidades</li> <li>▪ Habilidades existentes da força de trabalho</li> </ul>

**(b) Aspectos técnicos:** as dimensões relacionadas a questões de caráter técnico nos três modelos contêm subcomponentes ligados às capacidades tecnológicas, às capacidades dos recursos físicos para coletar, processar e distribuir informações para a empresa, e às demais partes interessadas, e assim criar valor.

O modelo 1 possui duas dimensões relacionadas a questões técnicas (Sistemas de informação, e Recursos). A dimensão “Recursos” enfatiza o provimento de recursos para a digitalização dos processos, a aquisição automatizada de dados, a comunicação estruturada, a descentralização e automação dos processos, a contextualização das adaptações tecnológicas direcionadas às tarefas específicas. A dimensão “Sistemas de informação” foca a importância central que possuem os sistemas de informação e operação para o contexto da Indústria 4.0, prevendo a integração dos mesmos de forma vertical na empresa, e horizontal ao longo da cadeia de valor, e através da padronização das interfaces de comunicação, com entrega de informações contextualizadas a cada equipe ou indivíduo.

O modelo 2 possui três dimensões relacionadas a questões técnicas (Operações, Tecnologia, Produtos). A dimensão “Operações” trata da descentralização e digitalização dos processos, e da colaboração interdisciplinar e interdepartamental. A dimensão “Tecnologia” está ligada à utilização de tecnologias aplicadas para melhorar a eficiência da comunicação e das operações, incluindo a comunicação entre máquinas. A dimensão “Produtos” traz uma abordagem da integração dos produtos com outros recursos e sistemas, através da digitalização dos mesmos, e aborda a flexibilidade de reconfiguração dos produtos, objetivando sua individualização.

O modelo 3 contempla quatro dimensões (Operações inteligentes, Fábricas inteligentes, Serviços derivados de dados coletados, e Produtos inteligentes) relacionadas a aspectos técnicos. Contempla de forma segmentada os principais aspectos para a composição de estruturas e recursos inteligentes para a visão de futuro. A dimensão “Operações inteligentes” enfatiza a agilidade, segurança e autonomia dos processos, além do compartilhamento de informações e o uso da computação em nuvem. A dimensão “Fábricas inteligentes” avalia a digitalização das instalações e equipamentos de produção, e do uso de dados a partir de sistemas integrados de informação e comunicação. A dimensão “Serviços derivados de dados coletados” avalia a oferta de serviços baseados nos dados coletados dos clientes e das condições de uso dos produtos, e a contribuição que esses serviços dão às receitas de empresa. A dimensão “Produtos inteligentes” avalia a existência de sistemas embarcados nos produtos e a utilização de dados coletados na fase de uso dos produtos pelos clientes.

A Tabela 9 abaixo resume a comparação dos aspectos técnicos dos modelos analisados.

Tabela 9 - Comparação dos aspectos técnicos dos subcomponentes dos modelos analisados

MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<p>➤ <b><u>Recursos:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prover competências digitais</li> <li>▪ Aquisição automatizada de dados através de sensores e atuadores</li> <li>▪ Processamento descentralizado de dados através de sistemas embarcados</li> <li>▪ Comunicação eficiente</li> <li>▪ Projeto de interfaces baseado em tarefas</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Tecnologia:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Existências de modernas tecnologias de informação e comunicação</li> <li>▪ Utilização de dispositivos móveis</li> <li>▪ Utilização de comunicação máquina-máquina (M2M)</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Fábricas inteligentes:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelagem digital</li> <li>▪ Infraestrutura de equipamentos</li> <li>▪ Uso de dados</li> <li>▪ Sistemas de Informação</li> </ul>
<p>➤ <b><u>Sistemas de Informação:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análise automatizada de dados</li> <li>▪ Entrega de informação contextualizada</li> <li>▪ Interfaces adaptadas às tarefas específicas</li> <li>▪ Construir uma infraestrutura de TIC resiliente e implementar armazenagem de dados baseada no contexto</li> <li>▪ Integrar os sistemas de informação de forma vertical e horizontal</li> <li>▪ Padronizar as interfaces de dados</li> <li>▪ Implementar governança de dados</li> <li>▪ Atualizar e aumentar a proteção de dados</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Operações:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Descentralização de processos</li> <li>▪ Modelagem e simulação</li> <li>▪ Interdisciplinaridade</li> <li>▪ Colaboração interdepartamental</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Operações inteligentes:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso da nuvem</li> <li>▪ Segurança das tecnologias de informação</li> <li>▪ Processos autônomos</li> <li>▪ Partilha de informações</li> </ul>
-----	<p>➤ <b><u>Produtos:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Individualização de produtos</li> <li>▪ Digitalização de produtos</li> <li>▪ Integração dos produtos em outros sistemas</li> <li>▪ Flexibilidade das características dos produtos</li> </ul>	<p>➤ <b><u>Produtos inteligentes:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Softwares embarcados nos produtos</li> <li>▪ Análise de dados durante a fase de utilização do produto</li> </ul> <p>➤ <b><u>Serviços derivados de dados coletados:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Disponibilidade de serviços baseados em dados coletados</li> <li>▪ Proporção de receitas derivadas de serviços baseados em dados coletados</li> <li>▪ Proporção de dados utilizados na fase de uso do produto</li> </ul>

(c) **Aspectos externos à empresa:** no modelo 2 existe uma dimensão que trata de aspectos externos à organização, e que não existe nos outros dois modelos, que é a dimensão “Governança”. Ela aborda questões como padronização de tecnologias, legislação trabalhista, e proteção de propriedade intelectual. São aspectos que fogem às capacidades da empresa em interferir nos mesmos. Portanto, julga-se que não possam ser avaliados quanto à maturidade da empresa. A Tabela 10 abaixo resume a comparação dos aspectos externos dos modelos analisados.

*Tabela 10 - Comparação dos aspectos externos às empresas dos subcomponentes dos modelos analisados*

MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
-----	<p>➤ <b><u>Governança:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regras trabalhistas para a Indústria 4.0</li> <li>▪ Adequabilidade de padrões tecnológicos</li> <li>▪ Proteção de propriedade intelectual</li> </ul>	-----

(d) **Aspectos de mercado:** Questões relacionadas a “Clientes” e como a empresa se relaciona com os mesmos, constam nas capacidades de todos modelos, mas está presente de forma destacada como uma dimensão somente no modelo 2, como mostra a Tabela 11. Aborda aspectos de gestão digital dos dados de clientes e das vendas, e da utilização destes dados.

*Tabela 11 - Comparação dos aspectos de mercado dos subcomponentes dos modelos analisados*

MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
-----	<p>➤ <b><u>Clientes:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilização de dados sobre os clientes</li> <li>▪ Digitalização das vendas e dos serviços</li> <li>▪ Organização digital de informações de clientes</li> </ul>	-----

3) **Níveis de maturidade:** não constavam no artigo consultado as descrições dos níveis de maturidade do modelo 2. Por isso, só foi possível a comparação dos níveis de maturidade dos modelos 1 e 3. Possuem algumas semelhanças quanto a utilização da tecnologia, mas devido ao fato de o modelo 1 ser um guia para elaboração de modelos de maturidade, ele possui descrições muito teóricas sobre os níveis de maturidade, não permitindo uma comparação objetiva e sintética com o modelo 3. O modelo 1 traz descrições mais genéricas dos estágios de maturidade, deixando margem à interpretação da maturidade de cada dimensão. O modelo 3 é mais objetivo e traz em cada nível, a descrição da maturidade abrangendo os objetivos a serem



atingidos em todas as dimensões. Isso traz mais clareza para a análise e para a utilização do modelo.

Também foi possível ter acesso às questões abordadas nas pesquisas e questionários de apenas um dos modelos avaliados, que foi do modelo 3, descrito na seção 2.6.3, pois foi disponibilizada uma ferramenta online para autoavaliação pelas empresas. As possíveis divergências entre as questões dos modelos, levam a diferentes classificações da maturidade das empresas, e a diferentes focos de atuação na implementação de ações corretivas e preventivas.

De acordo com os modelos estudados, há quatro tipos básicos de critérios utilizados para atribuição do nível de maturidade, cada qual com suas particularidades.

1) Atribuição direta do nível de maturidade a cada dimensão: torna a avaliação mais prática, porém mais subjetiva, e com menor profundidade da análise, pois desconsidera as avaliações de cada capacidade de transformação.

2) Média simples das avaliações das capacidades de transformação que compõem a dimensão: é uma medida que proporciona uma avaliação generalista da dimensão e tem a vantagem de prover uma visão geral entre os pontos fortes e fracos no desenvolvimento das ações. Mas possui a desvantagem de negligenciar as deficiências no caminho de transformação, pois sendo uma média, uma capacidade que está mais desenvolvida (boa avaliação) encobre as fraquezas de outra capacidade que esteja menos desenvolvida (má avaliação).

3) Menor valor atribuído às capacidades de transformação de cada dimensão: este critério baseia-se em uma avaliação mais rigorosa, pois assume que o equilíbrio da evolução das capacidades de transformação é essencial para o atingimento da maturidade da dimensão. Ao adotar o menor valor atribuído às capacidades, fortalece a visão do equilíbrio e da distribuição equitativa dos esforços em todas elas.

4) Média ponderada das avaliações das capacidades de transformação que compõem a dimensão: possui como característica principal a flexibilidade para a empresa definir o peso que cada capacidade de transformação tem para o seu negócio, possibilitando a adequação do modelo à sua realidade. Assim, caso uma capacidade não seja relevante para o negócio, ou mesmo não aplicável, pode-se atribuir um peso baixo ou mesmo nulo para o mesmo. A Equação 1 abaixo representa este critério.

Conforme a análise comparativa realizada entre os modelos, depreende-se da análise do modelo 1, um equilíbrio na avaliação de questões técnicas e comportamentais, para o atingimento da maturidade desejada, dando ênfase nas capacidades digitais e na aquisição e processamento de dados, como catalisadores da transformação para a Indústria 4.0. Além de constituir-se em um modelo de maturidade em si, ele é um guia que auxilia na construção de outros modelos de maturidade e provê o enquadramento teórico necessário a essa construção. O modelo 2 foi baseado em um artigo que é curto e incompleto na apresentação dos subcomponentes, além de não apresentar uma descrição dos níveis de maturidade. Portanto, as informações contidas nele não permitem uma avaliação holística do modelo, muito menos a sua reprodutibilidade para este trabalho. O modelo 3 mostrou-se mais completo e mais descritivo das questões abordadas. O documento é um relatório da aplicação do modelo em empresas do setor da fabricação de máquinas e equipamentos na Alemanha. As comparações realizadas

permitem uma compreensão mais ampla das diferentes abordagens adotadas pelos modelos, possibilitando melhorias e proposições.

### 3. DESENVOLVIMENTO E TESTE EMPÍRICO DE MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0

O objetivo geral deste capítulo foi a elaboração de um modelo descritivo de avaliação de maturidade de implementação das tecnologias e conceitos relacionados com a Indústria 4.0, que possa ser aplicado em empresas industriais e de serviços, a fim de que as mesmas possam identificar o estágio atual de maturidade, revelar as causas do não atingimento da maturidade desejada, e monitorar o desenvolvimento das ações que desenvolvam suas capacidades técnicas e gerenciais. Um modelo de maturidade descritivo pode ser entendido como um modelo que serve para avaliar a maturidade “como ela é”, ou seja, descreve a maturidade em sua situação atual, e não prevê indicações de melhorias de maturidade nem relaciona o resultado com a performance da empresa (De Bruin, Freeze, Kaulkarni, & Rosemann, 2005).

#### 3.1. Metodologia de desenvolvimento do modelo

A metodologia adotada para o desenvolvimento do modelo de maturidade deste trabalho foi baseada no processo de desenvolvimento de modelos de maturidade de De Bruin et al. (2005), que é uma metodologia aplicável a variados domínios do conhecimento, não se restringindo, portanto, ao domínio da Indústria 4.0. O processo acima também foi utilizado por Donovan et al. (2016), para o desenvolvimento do modelo de maturidade de capacidades analíticas industriais (IAMM - *Industrial Analytics Maturity Model*).

De Bruin et al. (2005) propõem em sua metodologia de desenvolvimento de modelos de maturidade uma sequência de seis etapas iterativas, pois os resultados de determinada fase podem requerer que uma fase anterior seja revisitada para aperfeiçoamento. A Figura 6 sintetiza as etapas do processo de desenvolvimento sugeridos, que estão descritas de forma resumida a seguir, para melhor compreensão da metodologia.

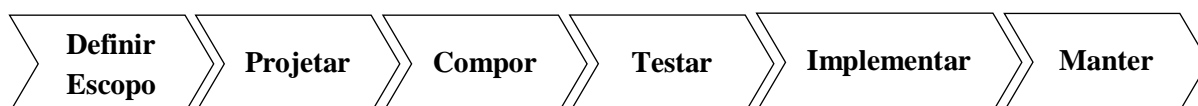


Figura 6 – Fases do processo de desenvolvimento de modelos de maturidade – adaptado de De Bruin et al. (2005)

**1) Definições do escopo do modelo** – a combinação de definições do escopo configurará as fronteiras externas para aplicação e uso do modelo. As principais definições nesta fase são o foco do modelo, compreendendo se o mesmo atende a um domínio específico ou possui um domínio geral, e o público-alvo que pretende atingir, se por exemplo pesquisadores acadêmicos e profissionais de empresas, instituições governamentais, ou mesmo uma combinação deles.

Tendo o modelo como foco um domínio específico, contribuirá para diferenciá-lo de outros modelos existentes, e determinará as especificidades e extensão de abrangência do modelo. Neste caso, o próprio público-alvo do modelo pode contribuir para sua elaboração e melhoria.

**2) Definições do projeto do modelo** – consiste nas definições do projeto do modelo, contemplando o entendimento das necessidades do público-alvo e como estas necessidades serão atendidas. Resumidamente, tenta responder às seguintes questões:

- Por que o público-alvo deste modelo deseja aplicá-lo?
- Como o modelo pode ser aplicado em variadas estruturas organizacionais?
- Quem necessita ser envolvido na aplicação do modelo?
- O que pode ser obtido através da aplicação do modelo?

Para suprir as necessidades do público-alvo, o modelo precisa ter um equilíbrio de complexidade e simplicidade, para responder à realidade, e ao mesmo tempo ser claro e simples no seu uso, evitando desinteresse e minimizando erros de aplicação, que podem gerar resultados equivocados. O autor sugere que de acordo com os modelos existentes, um princípio de projeto mais comumente utilizado é representar os níveis de maturidade em número cumulativo de estágios, sendo o menor número o de menor maturidade e o maior número o de maior maturidade, e sugere que os mesmos sejam identificados através de rótulos simples e objetivos. O número de estágios pode variar de cada modelo, mas o mais importante é que o último estágio seja distintivo e bem definido, e que haja um progresso lógico através dos estágios.

Os métodos de aplicação possíveis são a autoavaliação, quando a própria equipe de uma determinada empresa realiza a avaliação, e a avaliação de terceira parte, quando a avaliação é delegada a uma organização independente, podendo ser por exemplo uma empresa de consultoria ou de auditoria. A motivação da aplicação pode ser interna ou externa, a depender do requerente, se da própria organização, ou de terceiros, como ocorre nos casos de pesquisas científicas de universidades ou de órgãos governamentais e setoriais. Ou pode ser uma combinação dos dois.

Outra definição é sobre o perfil dos respondentes, que podem ser da equipe gerencial ou do corpo técnico da instituição avaliada, do corpo técnico da avaliadora de terceira parte, ou uma combinação deles. O perfil dos respondentes pode variar a cada instituição, de acordo com nível de detalhamento (componentes e subcomponentes) do modelo, podendo contemplar respondentes desde a presidência e áreas estratégicas, diretores e executivos, até o corpo gerencial e técnico.

Também pode ser definida a abrangência da aplicação do modelo, se por exemplo apenas uma instituição e apenas uma localidade, múltiplas instituições e apenas uma região, ou múltiplas instituições em mais de uma região.

**3) Composição do modelo** – etapa dedicada à composição e validação do modelo, compreendendo as atividades de concepção e construção do seu conteúdo, identificando o que precisa ser medido na avaliação de maturidade e como pode ser medido.

Em domínios maduros e complexos, as definições dos componentes e subcomponentes é uma tarefa crítica, pois requer um conhecimento profundo da maturidade do assunto, para que os resultados da avaliação possam prover estratégias de melhorias específicas. Um ponto importante nestas definições é que os componentes e subcomponentes do modelo sejam mutuamente excludentes e coletivamente exaustivos, ou seja, que sejam minimizadas as sobreposições de conceitos e ambiguidades, e sejam abordados os aspectos mais relevantes daquele domínio. Isso pode ser obtido através de uma consistente revisão de literatura e análise

de modelos existentes. Entrevistas podem ser feitas para confirmar os componentes e subcomponentes previamente definidos. A confirmação dos mesmos em fontes diversas aumenta a abrangência e adequação do modelo final.

Em um domínio de conhecimento relativamente novo, ou completamente novo, pode não ser suficiente a revisão de literatura para a definição dos componentes e subcomponentes, uma vez que o conhecimento explícito pode não cobrir os aspectos mais relevantes, devido às particularidades e constantes mudanças no estado da arte do domínio. Assim, a revisão de literatura serve apenas como um ponto de partida para a composição do modelo, sendo necessário complementar esta etapa com outros métodos de aquisição de conhecimentos, como por exemplo métodos empíricos de pesquisa, como métodos de grupos focais, método de *brainstorming* e método *Delphi*, estudos de caso, entrevistas, entre outros. Cada qual com suas vantagens e desvantagens, que precisam ser analisadas considerando a disponibilidade de tempo e recursos dos autores do modelo e dos demais participantes que colaboram com ele. O interessante é que possam ser conjugados diferentes métodos de aquisição de conhecimentos para tornar o modelo mais consistente e abrangente.

É necessário também definir como a medição de maturidade dos componentes e subcomponentes será feita, ou seja, os instrumentos utilizados na condução das avaliações, e a inclusão de questões apropriadas neste instrumento. Podem ser empregados por exemplo um método quantitativo para um público diverso e representativo, disponível em meios eletrônicos e *online*, o que permite uma análise estatística consistente, além de comparações de variadas fontes. Com relação à utilização de questões orientadoras, as principais referências são os próprios componentes e subcomponentes definidos previamente, e questões utilizadas em outros modelos do mesmo domínio. A utilização de uma escala de *Likert*, ou outra semelhante, pode aumentar a confiabilidade e consistência das respostas, e facilitar para que os resultados obtidos sejam relacionados aos estágios de maturidade. Outra possibilidade é a atribuição direta pelos respondentes de um nível de maturidade dos componentes e subcomponentes. É importante que haja um equilíbrio na quantidade de questões a serem utilizadas, para que haja uma compreensão adequada do item avaliado, mas que não seja exaustivo para evitar confusões e duplicidades, e causar desinteresse por parte dos intervenientes da pesquisa.

**4) Teste piloto do modelo** – uma vez que o modelo inicial tenha sido desenvolvido e validado, ele precisa ser testado junto ao seu público-alvo, para que seja verificada sua adequação de forma e conteúdo. O teste de validação da forma pode ser feito avaliando-se a clareza de entendimento dos termos e conceitos utilizados, tanto nos componentes e subcomponentes, quanto nas questões, além da avaliação da praticidade de utilização do modelo. Essa validação é feita através das técnicas utilizadas na composição do modelo junto aos colaboradores dos grupos focais e das entrevistas. O teste de validação do conteúdo pode ser feito avaliando-se quão representativo é o modelo em medir os principais aspectos do domínio de interesse. A extensão da revisão de literatura pode ser um bom aspecto de avaliação. As respostas e contribuições dos respondentes da pesquisa na fase de composição também podem auxiliar para avaliar a adequação do conteúdo, e se necessário revisar o modelo.

Diferentes técnicas qualitativas e quantitativas podem ser empregadas para testar o modelo, como estudos de caso, contemplando questionários e entrevistas, junto ao público-alvo. Os respondentes podem ser questionados sobre a estrutura do instrumento de avaliação,

por exemplo o questionário ou formulário utilizado, a facilidade de utilização do mesmo, o tempo necessário para que seja completado, e se as questões estão bem formuladas.

**5) Distribuição do modelo** – após o modelo ter sido validado e testado junto ao público-alvo, ele pode ser disponibilizado para uso pelos interessados. Duas questões importantes precisam ser levadas em conta para que o modelo esteja acessível e seja amplamente aceito. A primeira está relacionada à utilização inicial do modelo. Os primeiros usuários podem ser os respondentes da pesquisa empírica de validação e teste piloto, ou mesmo as organizações às quais pertencem os autores. A segunda questão é sua ampla divulgação, além dos participantes da composição e teste. Para modelos de domínios específicos, quando apenas uma instituição participou das fases anteriores, a procura por instituições similares, mesmo que sejam de diferentes mercados, pode fazer parte de uma lista de futuros interessados e utilizadores do modelo. Para domínios gerais, onde participaram múltiplos intervenientes nas fases anteriores, a utilização de associações e comitês pode ser mais apropriada. Dependendo do escopo de aplicação do modelo, a seleção de um determinado público abrangendo por exemplo um setor industrial, uma região, faixa de faturamento, número de empregados, entre outros, pode auxiliar na empregabilidade do modelo. Por fim, a identificação de organizações que podem se beneficiar de sua utilização, e a habilidade de aplica-lo a múltiplas organizações também podem contribuir para a padronização e aceitação global do modelo.

**6) Manutenção do modelo** – a manutenção do modelo de maturidade é impactada diretamente pela necessidade de recursos necessários para a sua atualização e utilização ao longo do tempo. Estes recursos, como por exemplo um repositório de dados, são necessários para suportar um grande volume de utilizações do modelo. A disponibilidade de recursos é determinada a partir da definição do escopo. Se por exemplo for pretendido que o modelo esteja disponível na internet, ou se algum *software* for desenvolvido para sua utilização, serão requeridos diversos recursos para que sua interface esteja sempre atualizada, e acompanhe a evolução tecnológica, além é claro do próprio conteúdo, que pode variar ao longo do tempo e necessitar de atualizações. A relevância de um modelo é assegurada somente mantendo-o atualizado ao longo do tempo.

### **3.2. Elaboração, validação e teste do modelo de maturidade**

A construção do modelo de maturidade proposto está detalhada nos subcapítulos abaixo, e seguiu a metodologia proposta por De Bruin et al. (2005), onde foram realizadas as quatro primeiras etapas do total de seis etapas da metodologia.

#### **3.2.1. Etapas 1 e 2 – Definição do escopo e projeto do modelo**

A etapa 1 consistiu na definição do escopo do modelo. O domínio de conhecimento é específico, e já era pré-estabelecido pelo objetivo deste trabalho, sendo a avaliação de maturidade na implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. A definição do público-alvo teve como resultado os públicos acadêmico e empresarial. O público acadêmico pode utilizar o modelo para a realização de pesquisas científicas, como por exemplo realizar pesquisas em empresas de determinado setor industrial, ou mesmo de diversos setores industriais, comparar seus resultados, gerar conclusões, e publicar o material para aumento de conhecimento científico a respeito do tema. O público empresarial pode utilizar o modelo para

avaliar a maturidade de uma empresa especificamente, para monitorar a evolução das capacidades. Também pode utilizá-lo para avaliar um determinado setor industrial.

Na etapa 2, de projeto do modelo, foram melhor detalhados o público-alvo, consistindo de professores, pesquisadores, e estudantes, para o público acadêmico, e de gestores, técnicos e consultores, para o público empresarial. Os respondentes escolhidos para a validação e teste piloto, são os gestores das empresas analisadas designados para esta atividade, que possuem os conhecimentos suficientes para avaliarem as questões estratégicas, táticas e operacionais, das diversas disciplinas envolvidas. O método escolhido foi a autoavaliação, onde os respondentes das empresas simularam a avaliação, como se estivessem o fazendo de forma autoadministrada.

### **3.2.2. Etapa 3 – Composição e validação do modelo**

Com objetivo de fundamentar o desenvolvimento do modelo de avaliação de maturidade proposto, foi importante a análise comparativa dos modelos analisados na revisão bibliográfica, conforme o subcapítulo 2.6.4, a fim de identificar os pontos convergentes e divergentes. Assim, foi possível extrair as melhores práticas da metodologia de cada um deles, e propor um modelo ajustado e otimizado. Foram definidos os elementos que compuseram o modelo, tendo em vista que os modelos analisados possuem diferentes complexidades em suas composições e diferentes abordagens na metodologia de avaliação e mensuração.

Dentre os modelos de maturidade analisados no subcapítulo 2.6, o modelo 3 – IMPULS-VDMA – foi o mais completo, possuindo um documento oficial e bem detalhado do modelo (Lichtblau et al., 2015), contendo a descrição das dimensões, das capacidades de transformação, e dos níveis de maturidade. O fato de possuir as questões orientadoras da avaliação, através de uma ferramenta online de autoavaliação, ajuda também a entender melhor a abordagem utilizada na pesquisa junto às empresas abrangidas pela VDMA - Associação de fabricantes de máquinas e equipamentos da Alemanha, uma importante e respeitada associação de um país que está na vanguarda da Indústria 4.0, contando com grandes multinacionais reconhecidas em seus mercados.

Pelos motivos explicitados no parágrafo acima, o modelo de maturidade do IMPULS-VDMA foi utilizado como referência, aproveitando-se a composição e os conceitos do mesmo, juntando as análises e percepções obtidas através dos estudos dos demais modelos. Assim, foi possível consolidar um novo modelo, com algumas mudanças e melhorias conceituais, principalmente quanto à inclusão e alteração, e agrupamento das capacidades de transformação nas respectivas dimensões.

#### **3.2.2.1. Composição do modelo de maturidade**

O modelo proposto é composto de quatro elementos integrantes, sendo eles: (i) as dimensões, (ii) as capacidades de transformação, (iii) os níveis de maturidade, e (iv) as questões da avaliação. Os elementos (i) e (ii) são denominados na metodologia de De Bruin et al. (2005) como componentes e subcomponentes, respectivamente. Neste trabalho foram denominados por “dimensões” e “capacidades de transformação”, respectivamente, para acompanhar a denominação conferida pelo modelo de referência. Os elementos integrantes deste modelo são interdependentes e possuem funções específicas para a avaliação, sendo detalhados abaixo:

### 3.2.2.1.1. Dimensões

As dimensões da avaliação são multidisciplinares, e podem ser entendidas como os fatores de agrupamento das capacidades de transformação (subcomponentes). Elas têm a função de gerar uma visão sintética dos principais aspectos que envolvem o desenvolvimento da Indústria 4.0, contemplando os recursos humanos, tecnológicos, os produtos, os processos e a orientação estratégica da empresa. As dimensões não possuem hierarquia, sendo todas elas igualmente importantes para o alcance dos objetivos de transformação. Com base na análise comparativa realizada no subcapítulo 2.6.4, foi importante realizar algumas pequenas alterações no modelo de referência, nas dimensões relacionadas a aspectos comportamentais e de gestão e a aspectos técnicos. As alterações permitiram uma melhor organização das dimensões do modelo e refletiram as alterações e inclusões realizadas nas capacidades (subcomponentes), como pode ser observado na Tabela 12. Dependendo dos objetivos e da posição estratégica, bem como dos planos em termos da Indústria 4.0, nem toda empresa necessita implementar completamente todas as dimensões propostas neste modelo.

São apresentadas abaixo as dimensões propostas neste trabalho:

- 1. Estratégia, estrutura e cultura organizacionais**
- 2. Equipes de trabalho**
- 3. Fábricas inteligentes**
- 4. Processos inteligentes**
- 5. Produtos e serviços inteligentes**

*Tabela 12 – Comparação das dimensões propostas com as dimensões do modelo de referência*

<b>DIMENSÕES IMPULS-VDMA</b>	<b>DIMENSÕES PROPOSTAS</b>
Estratégia e organização	Estratégia, estrutura e cultura organizacionais
Força de trabalho	Equipes de trabalho
Fábricas inteligentes	Fábricas inteligentes
Operações inteligentes	Processos inteligentes
Produtos inteligentes	Produtos e serviços inteligentes
Serviços derivados de dados coletados	

A dimensão “Estratégia e organização” do modelo de referência foi alterada para “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais”, com a finalidade de contemplar questões relacionadas às responsabilidades da alta administração, e incorporar questões relacionadas à estrutura e cultura organizacionais, consideradas importantes no desenvolvimento da Indústria 4.0, presentes nos demais modelos analisados, e não contempladas no modelo de referência. A dimensão “Força de trabalho” teve uma pequena alteração semântica para “Equipes de trabalho”, assim como a dimensão “Operações inteligentes” que foi alterada para “Processos inteligentes”. As dimensões “Produtos inteligentes” e “Serviços derivados de dados coletados” foram unificadas na dimensão “Produtos e serviços inteligentes”, uma vez que estão fortemente relacionadas, além de dois dos três itens de avaliação utilizados na dimensão “Serviços derivados de dados coletados” no modelo de referência serem indicadores que medem respectivamente a proporção das receitas proveniente de serviços baseados em dados e a



proporção da utilização de dados utilizados na fase de uso dos produtos. As dimensões “Governança” e “Clientes”, presentes no modelo 2, não foram utilizadas destacadamente neste modelo, porque possuem capacidades que estão fora do escopo de atuação da empresa, e por isso não pode avaliá-las nem realizar ações de resposta. E algumas capacidades aproveitadas destas dimensões foram alocadas ou estão implícitas em outras dimensões propostas.

As dimensões definidas no modelo possuem uma descrição, que justifica suas utilizações, e fundamenta o processo evolucionário de aperfeiçoamento do modelo, com a possível inclusão, exclusão ou alteração das mesmas ao longo do tempo. A Tabela 13 apresenta as descrições, ou justificativas, das dimensões propostas:

*Tabela 13 – Descrições das dimensões propostas no modelo*

<b>DIMENSÃO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</b>	A evolução rumo à Indústria 4.0 necessita de uma mudança de paradigmas da alta administração, através da promoção e disseminação de uma cultura de inovação e melhoria contínua, da disponibilização de recursos necessários para implementação de novas tecnologias de informação e operação, da adequação da estrutura organizacional, e da busca constante pela satisfação das necessidades dos consumidores.
<b>Equipes de trabalho</b>	As transformações digitais e o uso intensivo de tecnologias inovadoras não são possíveis sem a devida qualificação e constante atualização das habilidades técnicas e de gestão das equipes de trabalho. As equipes necessitam estar abertas às inovações tecnológicas, e possuírem flexibilidade e autonomia para rápidas mudanças de contexto.
<b>Fábricas inteligentes</b>	As fábricas do futuro, compostas por sensores e atuadores inteligentes, e instalações e equipamentos com sistemas embarcados avançados, permitirão a comunicação em tempo real entre as máquinas, os produtos, as pessoas e as infraestruturas, formando um ambiente de rede digital.
<b>Processos inteligentes</b>	A conectividade e interoperabilidade dos sistemas de informação e operação, dos equipamentos e instalações, possibilitarão a existência de sistemas e processos autônomos. Dotados de algoritmos avançados de inteligência artificial, contribuirão para o contínuo aprendizado das máquinas, possibilitando a auto-otimização e autoconfiguração dos processos de produção, manutenção, logística, e processos de apoio.
<b>Produtos e serviços inteligentes</b>	Produtos com sistemas inteligentes embarcados, dotados de inteligência artificial, constituirão a base para a coleta de informações em tempo real, permitindo a comunicação constante com o cliente, com a fábrica e com os processos produtivos ao longo da cadeia de valor. Serviços complementares aos produtos, e novos serviços, baseados em dados coletados, e possibilitados pelas tecnologias de conectividade, serão uma fonte importante de receitas das empresas.

### 3.2.2.1.2. Capacidades de transformação

As capacidades são a base do processo de transformação para a Indústria 4.0, e podem ser entendidas como sendo as áreas de interesse a serem trabalhadas pela empresa, através da estratégia e das ações a serem executadas em cada uma delas para o alcance dos objetivos estratégicos da Indústria 4.0. São de fato, os itens de avaliação, que receberão uma classificação mensurável de maturidade. São os princípios mais relevantes que norteiam o sucesso na implementação dos conceitos e tecnologias inovadoras e em alguns casos disruptivas. Podem ser divididos ainda em metas mensuráveis de curto, médio e longo prazos, mas a definição destas metas não fez parte do escopo deste trabalho e são inerentes à realidade de cada empresa. As capacidades de transformação propostas foram comparadas com as capacidades do modelo de referência, e justificadas as alterações, inclusões e exclusões, conforme a Tabela 14 abaixo.

*Tabela 14 – Comparação das capacidades propostas com as capacidades do modelo de referência*

CAPACIDADES IMPULS-VDMA	CAPACIDADES PROPOSTAS
<b>1. <u>Estratégia e organização:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0</li> <li>▪ Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0</li> <li>▪ Gestão da Inovação e uso de tecnologia</li> </ul>	<b>1. <u>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análise dos impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa</li> <li>▪ Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0</li> <li>▪ Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0</li> <li>▪ Gestão da inovação e uso de tecnologias</li> <li>▪ Disponibilidade de recursos para realização das ações</li> <li>▪ Foco nos benefícios aos clientes</li> <li>▪ Colaboração com outras empresas da cadeia de valor</li> <li>▪ Existência de coordenação central para a Indústria 4.0</li> </ul>
<b>2. <u>Força de trabalho:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aquisição de habilidades</li> <li>▪ Habilidades existentes da força de trabalho</li> </ul>	<b>2. <u>Equipes de trabalho</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Habilidades existentes e requeridas</li> <li>▪ Aquisição de habilidades</li> <li>▪ Flexibilidade e autonomia das equipes</li> <li>▪ Criatividade e enriquecimento do trabalho</li> <li>▪ Abertura à inovação e responsividade à mudança</li> </ul>

CAPACIDADES IMPULS-VDMA	CAPACIDADES PROPOSTAS
<b>3. <u>Fábricas inteligentes:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelagem digital</li> <li>▪ Infraestrutura de equipamentos</li> <li>▪ Uso de dados</li> <li>▪ Sistemas de Informação</li> </ul>	<b>3. <u>Fábricas inteligentes</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelagem digital de instalações e equipamentos</li> <li>▪ Infraestrutura de equipamentos com sistemas embarcados</li> <li>▪ Sistemas integrados de informação, comunicação e operação</li> <li>▪ Aquisição de dados através de sensores e atuadores</li> <li>▪ Equipamentos autônomos e inteligência artificial</li> <li>▪ <i>Layouts</i> reconfiguráveis</li> <li>▪ Utilização de dispositivos móveis</li> </ul>
<b>4. <u>Operações inteligentes:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso da nuvem</li> <li>▪ Segurança das tecnologias de informação</li> <li>▪ Processos autônomos</li> <li>▪ Partilha de informações</li> </ul>	<b>4. <u>Processos inteligentes</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso da computação em nuvem</li> <li>▪ Segurança dos ativos e proteção de dados</li> <li>▪ Processos autônomos</li> <li>▪ Modelagem e simulação digitais de processos</li> <li>▪ Compartilhamento ágil de informações</li> <li>▪ Computação visual e interfaces contextualizadas às tarefas</li> <li>▪ Capacidade analítica de dados e inteligência artificial</li> </ul>
<b>5. <u>Produtos inteligentes:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Softwares embarcados nos produtos</li> <li>▪ Análise de dados durante a fase de utilização do produto</li> </ul>	<b>5. <u>Produtos e serviços inteligentes</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Softwares embarcados nos produtos</li> <li>▪ Análise de dados durante a fase de utilização do produto</li> <li>▪ Oferta de serviços baseados em dados coletados</li> <li>▪ Projeto e simulação digitais de produtos</li> <li>▪ Segmentação e individualização de produtos e serviços</li> <li>▪ Capacidade de reconfiguração ágil de produtos</li> <li>▪ Integração dos produtos com outros sistemas</li> </ul>
<b>6. <u>Serviços derivados de dados coletados:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Disponibilidade de serviços baseados em dados coletados</li> <li>▪ Proporção de receitas derivadas de serviços baseados em dados coletados</li> <li>▪ Proporção de dados utilizados na fase de uso do produto</li> </ul>	

As diferenças (exclusões, modificações e inclusões) das capacidades do modelo de referência para as capacidades propostas são abordadas adiante, agrupadas em suas respectivas dimensões.

Na dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais”, foram mantidas as capacidades do modelo de referência e incluídas outras capacidades com base nos modelos analisados. A capacidade “Análise dos impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa” foi incluída com base na revisão bibliográfica. A capacidade “Disponibilidade de recursos para realização das ações” foi baseada no modelo 2. As capacidades “Foco nos benefícios aos clientes” e “Colaboração com outras empresas da cadeia de valor” foram incluídas com base no modelo 1. A inclusão da capacidade “Existência de coordenação central para a Indústria 4.0” foi baseada no modelo 2.

Na dimensão “Equipes de trabalho”, foram mantidas as capacidades do modelo de referência e adicionadas novas capacidades. Foi modificado o texto da dimensão “Habilidades existentes” do modelo de referência para “Habilidades existentes e requeridas” para reforçar a constante análise entre as habilidades existentes na empresa e as requeridas para o sucesso da transformação para a Indústria 4.0. As capacidades “Flexibilidade e autonomia das equipes” e “Abertura à inovação e responsividade à mudança” foram incluídas com base no modelo 1 e no modelo 2. Foi incluída a capacidade “Criatividade e enriquecimento do trabalho”, com base na revisão bibliográfica.

Na dimensão “Fábricas inteligentes”, foram feitas modificações nas capacidades que constam no modelo de referência, para destacar melhor as abrangências pretendidas das capacidades, mas sem alterar seus objetivos. Com base na revisão bibliográfica realizada, foram incluídas as capacidades “*Layouts* reconfiguráveis”, que adiciona valor de flexibilidade de adaptação de variedade e volume da capacidade produtiva, e a capacidade “Equipamentos autônomos e inteligência artificial”, que propicia a descentralização do controle dos equipamentos e maior produtividade de sistemas complexos, baseado na aprendizagem de máquinas. E também foi incluída a capacidade “Utilização de dispositivos móveis”, com base no modelo 2.

Na dimensão “Processos inteligentes”, também foram mantidas as capacidades do modelo de referência e feitas pequenas alterações nas descrições, mas sem alterar o sentido. Foi incluída a capacidade “Modelagem e simulação digitais de processos”, com base no modelo 2. Foi incluída “Capacidade analítica de dados e inteligência artificial”, que é uma capacidade do modelo de referência com a descrição “Uso de dados”, mas que constava na dimensão “Fábricas inteligentes”. Entendeu-se que seria mais adequada sua alocação na dimensão “Processos inteligentes”, uma vez que quem usa dados são processos, e feitas modificações na descrição para contemplar a utilização de inteligência artificial. Também foi incluída a capacidade “Computação visual e interfaces contextualizadas às tarefas”, baseado no modelo 1 e na revisão bibliográfica.

A dimensão “Produtos e serviços inteligentes”, é uma aglutinação das dimensões “Produtos inteligentes” e “Serviços baseados em dados coletados” do modelo de referência. Foram mantidas três capacidades do modelo de referência, e excluídas as capacidades “Proporção de receitas derivadas de serviços baseados em dados coletados” e “Proporção de dados utilizados na fase de uso do produto”, por tratarem-se de indicadores utilizados no modelo de referência para a confecção do relatório da pesquisa, podendo ser suprimidos sem perdas para o trabalho. Foram incluídas as capacidades “Projeto e simulação digitais de produtos”, “Segmentação e individualização de produtos e serviços” e “Capacidade de

reconfiguração ágil de produtos”, e “Integração dos produtos com outros sistemas”, com base no modelo 2, e com base na revisão bibliográfica.

As capacidades de transformação definidas neste trabalho são apresentadas no Anexo I, agrupadas em suas respectivas dimensões, e acompanhadas das respectivas descrições, e da relação que possuem com os conceitos, os princípios de projeto (*design principles*), e tecnologias abordados na revisão bibliográfica.

### 3.2.2.1.3. Níveis de maturidade

Neste modelo proposto, foram detalhados os níveis de maturidade máximos a serem atingidos (nível 5) em cada dimensão. Subentende-se que os níveis de 0 a 4 são evoluções incrementais a partir do nível máximo. O ideal é que a empresa evolua de forma equilibrada no processo de transformação digital, e assim as dimensões estejam em níveis aproximados de maturidade, o que reflete um bom planejamento e execução das ações de resposta da empresa. Entende-se que as dimensões possuam importâncias relativas, não necessariamente iguais, para o atingimento dos objetivos estratégicos de cada empresa, a depender do setor e da estratégia de atuação, e que se uma dimensão falha no amadurecimento, ela influenciará negativamente no desempenho das demais dimensões, comprometendo a estratégia da organização.

São descritos abaixo os níveis de maturidade máximos – nível 5 (estado da arte) – de cada dimensão do modelo. São descrições genéricas e aproximadas do nível máximo a ser atingido pelas empresas. A partir destes níveis máximos, a empresa avalia sua maturidade em níveis intermediários de implementação dos conceitos e tecnologias relacionados às capacidades constantes em cada dimensão.

#### 1) Estratégia, estrutura, e cultura organizacionais

Sua estratégia de atuação, baseada na Indústria 4.0, é referência para os competidores e a empresa percebe enormes benefícios econômicos da digitalização de seus processos, compreendendo todo o ciclo de vida de seus produtos e serviços.

Possui flexibilidade e agilidade para adaptar seu modelo de negócios e seu portfólio de produtos e serviços, para uma atuação preditiva e responsiva às novas demandas.

Faz das tecnologias de informação e operação suas principais forças de competição, e percebe grandes benefícios econômicos desta estratégia.

Disponibiliza os recursos humanos, materiais, e financeiros necessários para a operacionalização da estratégia, e monitora indicadores adequados para medir a eficácia das ações.

É indutora da colaboração e compartilhamento de informações e recursos nas cadeias de valor nas quais está inserida.

A estratégia corporativa e seus desdobramentos possuem um forte foco nos requisitos do cliente, obtidos e interpretados pela análise de dados em tempo real.

Possui uma estrutura organizacional aberta ao aprendizado contínuo e orientada à inovação, com uma coordenação central para os projetos da Indústria 4.0. Realiza significativos esforços de pesquisa, desenvolvimento e inovação de produtos e processos inovadores.

## **2) Equipes de trabalho**

Analisa constantemente as habilidades existentes e as necessárias para a implementação das ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0.

A empresa é referência na capacitação e disseminação dos conceitos da Indústria 4.0 aos funcionários, desde a alta administração ao chão de fábrica, seja através de multiplicadores internos ou externos.

O processo de tomada de decisões é descentralizado, e possibilita a agilidade na adaptação às mudanças de contexto, baseada na análise de dados em tempo real. A estrutura organizacional promove a flexibilidade e autonomia dos empregados, resultando em empoderamento e satisfação das equipes, que passam a ser autogeridas.

Promove intensamente a criatividade e abertura à inovação nas equipes, e se apoia na modernização tecnológica como forma de aumentar a comunicação, diminuir os tempos de resposta, e se antecipar às mudanças de contexto.

## **3) Fábricas inteligentes**

As instalações e os equipamentos de produção possuem cópias digitais, com atualização bidirecional de informações entre o mundo físico e o mundo virtual, que possibilitam o monitoramento e controle remotos das operações.

As instalações e os equipamentos de produção possuem sistemas embarcados que comunicam entre si e com outros sistemas, possibilitando uma adaptação ágil a novos contextos de volume e de diversificação de oferta de produtos.

Possui sistemas integrados de informação e operação, e sistemas de modelagem e simulação das operações, permitindo a aquisição e análise de dados em tempo real.

Faz uso intensivo de robótica e equipamentos autônomos de produção, dotados de inteligência artificial, capazes de reconhecer os produtos, as pessoas e os demais equipamentos, comunicando-se com eles, além de possuírem capacidade de tomar decisões de forma descentralizada, possibilitando a auto-otimização do desempenho, a automanutenção, a reconfiguração, e alerta de falhas.

A estrutura fabril é concebida com instalações modulares inteligentes, que se reconfiguram de forma ágil, alterando o *layout* de forma descentralizada, o que permite uma flexibilidade e adaptação para a fabricação de um portfólio diversificado de produtos.

Faz uso intensivo de dispositivos inteligentes móveis (*mobile*) e vestíveis (*wearable*), tais como *tablets*, *smartphones*, relógios, braceletes, óculos, dotados de sensores, recursos de conectividade e inteligência artificial, além de aplicações de computação visual, para aumentar a eficiência e eficácia das operações.

## **4) Processos inteligentes**

O uso difundido da computação em nuvem na empresa, possibilita a flexibilidade e confiabilidade nos sistemas de informação e operação, aumentando a conectividade e interoperabilidade entre os equipamentos e demais sistemas.

A adoção de sistemáticas e recursos avançados de proteção dos dados e segurança dos ativos, conferem uma grande confiabilidade e integridade das operações, dos ativos e dos empregados.

Devido às capacidades de inteligência artificial presentes na infraestrutura e nos equipamentos, otimiza o uso dos recursos e necessita de pouca intervenção humana para a fabricação e transporte dos produtos.

É reconhecida como indutora do compartilhamento de informações ao longo da cadeia de valor, obtendo grandes benefícios da integração com os demais agentes da cadeia, e com parceiros do negócio.

Adota as melhores práticas de digitalização e integração dos processos produtivos, logísticos e processos de apoio, sendo referência na automação dos processos, realizados com um elevado grau de descentralização.

As principais atividades são orientadas por modelos digitais, e a produção possui uma cópia digital, que se comunica com a produção real, permitindo o controle e monitoramento da produção de forma remota.

Faz uso intensivo de recursos de computação visual, nas estações de trabalho, e em aplicações de dispositivos móveis, tais como a realidade virtual e realidade aumentada, sistemas supervisórios, que entregam informações contextualizadas e em tempo real às tarefas.

Realiza a análise automática de um grande volume de dados e em tempo real dos principais processos, que servem de entrada para uma rápida resposta aos eventos de mudança, possibilitando uma enorme flexibilidade e customização em massa dos produtos.

### **5) Produtos e serviços inteligentes**

É referência na oferta de produtos e serviços inteligentes, dotados de inteligência artificial, conhecendo eles mesmos os processos de suas fabricações, transportes e as condições de seus próprios usos, alertando os clientes e a fábrica sobre avarias, mal funcionamento ou condições de uso inadequadas.

Os produtos possuem capacidade de auto-otimização, e enviam à fábrica e aos parceiros as necessidades de alteração de suas configurações, que são prontamente recebidas pela equipe técnica, que realiza as alterações de forma ágil e customizada para atendimento das necessidades dos clientes.

Os produtos possuem projeto complementar digitalizado e comunicável com a operação, e os serviços agregados, derivados da análise em tempo real dos clientes e das condições de uso dos produtos, contribuem com uma parcela significativa das receitas.

Faz uso intensivo de simulação digital das condições de uso dos produtos, resultando num projeto mais confiável e adaptado às necessidades dos clientes.

Devido à grande flexibilidade e agilidade na concepção, projeto, e construção de produtos e serviços, possui capacidade de segmentar os produtos, produzindo-os em pequenos lotes, ou mesmo de individualizá-los, atendendo à crescente customização da demanda.

Os sistemas embarcados nos produtos, são integrados e interoperáveis com outros sistemas, transmitindo e recebendo informações de equipes multidisciplinares ao longo do ciclo de vida dos produtos.

#### **3.2.2.1.4. Questões da avaliação**

Com objetivo de obter as respostas requeridas para a avaliação do nível de maturidade de determinada dimensão, foram desenvolvidas questões para orientar o respondente ou o avaliador, a estabelecer com maior precisão o nível de maturidade das capacidades, conforme apresentado no Anexo II. Foram elaboradas de forma a gerar uma compreensão objetiva, mas nem sempre exata, das capacidades (subcomponentes) as quais estão relacionadas. Cada questão possuirá sua própria classificação de maturidade, sendo estas as respostas obtidas diretamente pelos respondentes da avaliação. A partir das avaliações das questões, serão obtidas as classificações das capacidades e das dimensões de forma indireta, suportadas por critérios de mensuração.

Os critérios de mensuração de maturidade representam as traduções das avaliações semânticas e subjetivas, estabelecidas pelos níveis de maturidade, em um padrão objetivo de avaliação. São necessários para transformar os conceitos abstratos da manufatura avançada em itens que possam ser sistematicamente avaliados e convertidos em medidas numéricas. No caso deste modelo, os critérios são as métricas de cálculo, e têm a função de evidenciar o nível de maturidade a partir das respostas obtidas com as questões da avaliação.

Neste trabalho, será adotado o critério da média simples, para avaliação do nível de maturidade de cada dimensão, e do nível de maturidade global da empresa. Tanto para a classificação de maturidade das dimensões, e para a classificação global da empresa, os valores obtidos segundo os critérios de mensuração utilizados são arredondados com uma casa decimal. Mas caso o modelo seja usado por demais empresas ou pesquisadores, deve ser avaliado em cada caso qual critério é mais apropriado, considerando as restrições e estratégias individuais, podendo ser adotado um ou mais critérios dentre os destacados no subcapítulo 2.6.4, ou outros que a empresa julgar adequados.

#### **3.2.2.2. Validação do modelo – pesquisa empírica em empresas industriais**

Neste trabalho, além da revisão de literatura sobre o tema e a análise de outros modelos de maturidade relacionados, foi escolhido o método empírico de entrevistas qualitativas com empresas relevantes no setor industrial, com objetivo de obter contribuições de especialistas para a composição e validação do modelo. A validação do modelo buscou avaliar a sua abrangência e representatividade, ou seja, confirmar que o mesmo cobre as dimensões e as capacidades mais relevantes do processo de transformação digital de uma empresa de manufatura, através da contribuição de empresas intervenientes na Indústria 4.0. Essas empresas são impactadas na prática pelos conceitos e pelas tecnologias, confirmando a validade dos aspectos formais e do seu conteúdo.

Para a escolha de empresas para o teste piloto do modelo, foi necessária a decisão de uma das duas opções: aplicar o modelo em empresas de variados setores, ou escolher um setor de referência que já possua um reconhecido engajamento na Indústria 4.0. Nos dois casos há vantagens e desvantagens, pois aplicar em diferentes setores possibilitaria uma maior abrangência, alinhada ao objetivo de que se torne de fato uma ferramenta de aplicação multissetorial. Porém, com o inconveniente de não permitir comparações entre empresas do mesmo setor, e correr o risco de ter opiniões de profissionais ainda não habituados aos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Foi dada preferência para a escolha de apenas um setor industrial



para a aplicação do modelo, e foi escolhido o setor automotivo, pois o mesmo possui maior notabilidade no engajamento na Indústria 4.0, e conforme a literatura consultada, lidera os esforços no aprendizado e na aplicação dos conceitos e tecnologias aplicadas à Indústria 4.0. Devido ao fato de possuir maiores competências acumuladas na implementação de novas tecnologias, poderia dar maior contribuição para alterações que se fizessem necessárias para a melhoria do modelo, e desta forma, garantir maior assertividade de que as capacidades e as questões abordadas possuem de fato aderência aos requisitos da Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 será aplicada a muitos setores empresariais, contemplando automóveis, siderúrgicas, construção de navios, têxtil, energia elétrica, eletrônicos, indústria de máquinas e equipamentos, e muitos outros. Dentre estes, a indústria automobilística é a que mais cedo aplica os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, porque ela tem condições muito favoráveis seja em *hardware* ou em *software*, comparada com outras indústrias. Assim, ela tem mais benefícios no desenvolvimento de produtos, no planejamento da produção, e na integração da produção (Schuh et al., 2017).

Para a validação do modelo de maturidade, foi utilizado um questionário com perguntas qualitativas, conforme o modelo do Anexo III.

Segue nos parágrafos seguintes uma breve caracterização das empresas e dos profissionais respondentes das entrevistas, que contribuíram para a composição e validação do modelo. Duas empresas relevantes do setor industrial foram selecionadas para a validação, ambas multinacionais do setor automobilístico, e localizadas no Brasil. Ambas podem ser classificadas como manufaturas de classe mundial (*World Class Manufacturing - WCM*). Por questões de confidencialidade, os respectivos nomes das empresas não foram publicados, apenas os setores industriais aos quais pertencem.

Uma delas é fabricante de pneus de automóveis, denominada adiante como “empresa 1”, e a outra é uma montadora de automóveis, denominada adiante como “empresa 2”. A empresa 1 definiu a abrangência da pesquisa como sendo a unidade visitada, a empresa 2 definiu a operação a nível nacional, incluindo três unidades produtivas. De acordo com a pesquisa empírica, foi possível extrair algumas informações a respeito da organização e da abordagem de cada empresa na implementação da Indústria 4.0.

Os respondentes das entrevistas realizadas são das áreas de planejamento de produção, tecnologia de informação, planejamento corporativo, engenharia industrial, engenharia de produto, certificação e regulação, e engenharia de acessórios. Devido à diversidade de áreas do conhecimento às quais pertencem os respondentes, foi possível uma abordagem multidisciplinar nas contribuições recebidas.

Os respondentes afirmaram que em suas respectivas empresas, participam das iniciativas de implementação da Indústria 4.0 os seguintes departamentos, ou áreas funcionais: direção, planejamento corporativo, engenharia industrial, sistemas de produção, sistemas de informação, manufatura, engenharia de produto, certificação e regulação.

Quanto à participação em associações empresariais e comitês relacionados à Indústria 4.0, a empresa 1 afirmou não participar de nenhuma discussão interinstitucional. A empresa 2 participa de um comitê nacional, envolvendo órgãos públicos, universidades, associações

empresariais, e outras empresas privadas, que estão desenvolvendo a estratégia da Indústria 4.0 no Brasil, e políticas industriais voltadas para o setor automobilístico.

Com relação aos impactos esperados da Indústria 4.0 (positivos e negativos) para a competitividade da empresa, foram citados os seguintes:

a) Positivos: maior flexibilidade de produção, redução do tempo de planejamento, desenvolvimento, fabricação e redução de custos de equipamentos e dispositivos, maior velocidade de troca de informações entre departamentos e fornecedores, e tomada de decisões. Menor consumo de recursos de utilidades devido a tecnologias de monitoramento, sensores e atuadores. Melhoria no sistema de manutenção preventiva, devido à integração dos equipamentos na rede.

b) Negativos: maior risco de ataques cibernéticos devido à exposição da empresa à internet e outros dispositivos de comunicação, demissão de empregados devido à automação, e acirramento da concorrência.

Com relação às dificuldades de implementação da Indústria 4.0, considerando fatores externos à empresa, foram citadas:

- Parque industrial brasileiro sem conhecimento, não detentor das tecnologias da Indústria 4.0, havendo necessidade de importar tecnologia a custos mais elevados.
- Falta de incentivo à inovação do governo brasileiro, onerando e inviabilizando projetos.
- Diretrizes da matriz não alinhadas com as da empresa podem atrasar ou interromper projetos de melhoria em plantas afiliadas.

As principais dificuldades de implementação citadas por parte das empresas, do setor, e da cadeia de valor em que atuam, foram:

- Falta de conhecimento das tecnologias e benefícios da Indústria 4.0. Falta de comprovação do retorno de investimento.
- Planejamento corporativo estratégico não alinhado com a Indústria 4.0
- Benchmark insuficiente em outras afiliadas/plantas sobre Indústria 4.0

As principais contribuições para validação e melhoria do modelo, foram:

- 1) De uma forma geral, o modelo foi considerado objetivo e abrangente. Foi sugerido que o modelo a ser disponibilizado contenha um campo descritivo para embasar os níveis de maturidade percebidos.
- 2) Na questão “Os layouts de produção são reconfiguráveis de forma ágil, para atender às variações de diversificação e volume na oferta de produtos individualizados?”, foi sugerido quantificar sobre a velocidade de reconfiguração dos layouts (dias, semanas, etc...).
- 3) No modelo apresentado às empresas, o estado da arte não foi claramente identificado como sendo o nível de maturidade 5.
- 4) Foi sugerido que o modelo a ser publicado contenha um anexo que explique melhor alguns conceitos e tecnologias, traga exemplos, ou explique algumas terminologias incomuns utilizadas.
- 5) Acrescentar item que mede a capacidade ou diferenciais de planejamento e desenvolvimento das fábricas inteligentes, processos, produtos e serviços (de que forma é feito, quais tecnologias empregadas no desenvolvimento) antes da construção da fábrica.

- 6) Dividir a pergunta “As ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0 possuem como foco os requisitos do cliente?” da dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais” nas demais dimensões, abordando a estratégia de foco no cliente aos aspectos de cada dimensão (fábricas, processos, produtos e serviços).
- 7) A pergunta “Há compartilhamento das informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor, para uma ágil tomada de decisões?” ficou mal compreendida.
- 8) Reavaliar o uso do termo “cópias digitais”.

A análise da etapa de validação do modelo permitiu uma avaliação geral do modelo, considerando sua abrangência e adequação com a realidade industrial. De uma maneira geral, as empresas avaliaram o modelo como adequado para os objetivos a que se propõe, e fizeram algumas sugestões de melhoria, que foram analisadas, tendo algumas delas incorporadas ao modelo e outras não.

Com relação às dimensões, capacidades, e questões orientadoras da avaliação, contempladas nas contribuições “2”, “5”, “6”, “7”, e “8”, não houve alterações a partir das sugestões das empresas, pois julgou-se que não eram procedentes ou não mudariam substancialmente o entendimento. O item “2” sugere quantificar o horizonte temporal da reconfiguração dos *layouts*, mas como o modelo é transversal a diversos setores, e a empresas de variados portes e níveis de demanda, essa quantificação deve ser feita de forma subjetiva na avaliação de cada empresa. O item “5” sugere que seja incluída uma capacidade para avaliar questões de planejamento e execução dos produtos e processos antes da construção das fábricas, mas julgou-se que esta abordagem está implícita nas questões, pois o desafio de trazer inteligência e conectividade às fábricas, produtos e processos, deve estar presente desde a fase de concepção e planejamento das ações, passando pela construção e fabricação das estruturas fabris e dos produtos, até a entrega dos produtos e serviços aos clientes. Para o item “6”, foi julgado que está adequado da forma original, pois não é necessário que a avaliação da orientação ao cliente se faça presente em cada dimensão, bastando a sua avaliação de forma holística em apenas uma questão, que está enquadrada na dimensão que avalia as responsabilidades da alta administração, e implicitamente entende-se que será desdobrada em cada dimensão. Os itens “7” e “8” trataram de termos técnicos, que não foram alterados, pois os mesmos estão fundamentados na revisão bibliográfica. Os itens “1” e “3” foram considerados procedentes e incorporados no modelo.

De forma resumida, a etapa de validação do modelo teve como objetivo confirmar se o modelo desenvolvido, baseado na revisão bibliográfica e na análise comparativa realizada, está adequado para suas finalidades e colher contribuições de melhoria.

### 3.2.3. Etapa 4 – Teste piloto do modelo

A etapa 4, de teste piloto do modelo, consistiu no teste empírico de aplicação do modelo junto a uma pequena amostra de empresas pertencentes ao público-alvo. Pressupunha que o modelo, após formulado e validado, fosse testado empiricamente, de forma a averiguar a sua usabilidade e adequabilidade. Buscou-se uma metodologia onde os respondentes utilizaram o modelo para avaliar a maturidade de suas respectivas empresas, da mesma forma como fariam de forma autoadministrada. Os respondentes das pesquisas, realizadas na forma de entrevistas presenciais, pertencem ao quadro funcional das empresas, e foram designados para a pesquisa.

Coube ao autor e pesquisador, a função de intermediador e observador, colhendo os resultados e as percepções durante a avaliação.

Para exemplificar a aplicação do modelo, por conveniência foram utilizadas para o teste piloto as mesmas empresas e respectivos respondentes que participaram da etapa 3 de composição e validação do modelo, e foram caracterizadas no subcapítulo 3.2.2. As empresas foram denominadas por “empresa 1”, uma fabricante de pneus de automóveis, e “empresa 2”, uma montadora de automóveis.

Para a realização do teste piloto do modelo nas empresas selecionadas, foi utilizado o questionário com as questões da avaliação, conforme Anexo II, e um guia que resume as dimensões e capacidades avaliadas, que foi enviado alguns dias antes das reuniões, para que os respondentes pudessem se preparar antecipadamente.

Os resultados obtidos na avaliação de maturidade das empresas selecionadas permitem análises e interpretações, considerando o porte e a relevância das empresas analisadas para o setor automotivo, que tradicionalmente está na vanguarda das inovações tecnológicas industriais. Mas não servem como base para afirmações conclusivas que se estendam ao setor automobilístico, e nem ao setor industrial de forma geral. A partir dos resultados obtidos, alguns pontos fortes e fracos da avaliação de cada empresa podem ser destacados. Importante recordar que a classificação de maturidade varia entre 0 (nível mais baixo) e 5 (nível mais alto).

Não foi objetivo deste trabalho realizar recomendações de ações corretivas e preventivas nas empresas que contribuíram para a validação do modelo, pois entende-se que estas ações são derivadas da estratégia de cada empresa, e merecem um tratamento diferenciado de abordagem que possua este objetivo.

Os resultados apresentados nos relatórios estão suportados nas avaliações das perguntas orientadoras constantes no Anexo IV, e que são de fato as respostas diretamente obtidas junto aos entrevistados.

### 3.2.3.1. Relatório do teste piloto da “empresa 1”

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</b>	<b>2,5</b>	Análise dos impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa	<b>1</b>
		Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0	<b>0</b>
		Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0	<b>2</b>
		Gestão da inovação e uso de tecnologia	<b>2</b>
		Disponibilidade de recursos para realização das ações	<b>4</b>
		Foco nos benefícios aos clientes	<b>3</b>
		Colaboração com outras empresas da cadeia de valor	<b>4</b>
		Existência de coordenação central para a Indústria 4.0	<b>4</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Equipes de trabalho</b>	<b>2,6</b>	Habilidades existentes e requeridas	<b>3</b>
		Aquisição de habilidades	<b>1</b>
		Flexibilidade e autonomia das equipes	<b>3</b>
		Criatividade e enriquecimento do trabalho	<b>3</b>
		Abertura à inovação e responsividade à mudança	<b>3</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Fábricas inteligentes</b>	<b>2,9</b>	Modelagem digital de instalações e equipamentos	<b>4</b>
		Infraestrutura de equipamentos com sistemas embarcados	<b>4</b>
		Sistemas integrados de informação, comunicação e operação	<b>4</b>
		Aquisição de dados através de sensores e atuadores	<b>4</b>
		Equipamentos autônomos e inteligência artificial	<b>0</b>
		Layouts reconfiguráveis	<b>3</b>
		Utilização de dispositivos móveis	<b>1</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Processos inteligentes</b>	<b>2,4</b>	Uso da computação em nuvem	<b>4</b>
		Segurança dos ativos e proteção de dados	<b>4</b>
		Processos autônomos	<b>0</b>
		Compartilhamento ágil de informações	<b>3</b>
		Modelagem e simulação digitais de processos	<b>3</b>
		Computação visual e interfaces contextualizadas às tarefas	<b>2</b>
		Capacidade analítica de dados e inteligência artificial	<b>1</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Produtos e serviços inteligentes</b>	<b>2,0</b>	Softwares embarcados nos produtos	<b>0</b>
		Análise de dados durante a fase de utilização do produto	<b>0</b>
		Oferta de serviços baseados em dados coletados	<b>2</b>
		Projeto e simulação digitais de produtos	<b>4</b>
		Segmentação e individualização de produtos e serviços	<b>4</b>
		Capacidade de reconfiguração ágil de produtos	<b>4</b>
		Integração dos produtos com outros sistemas	<b>0</b>

O gráfico da Figura 7 abaixo apresenta de forma resumida as classificações das dimensões abordadas na avaliação da “empresa 1”:

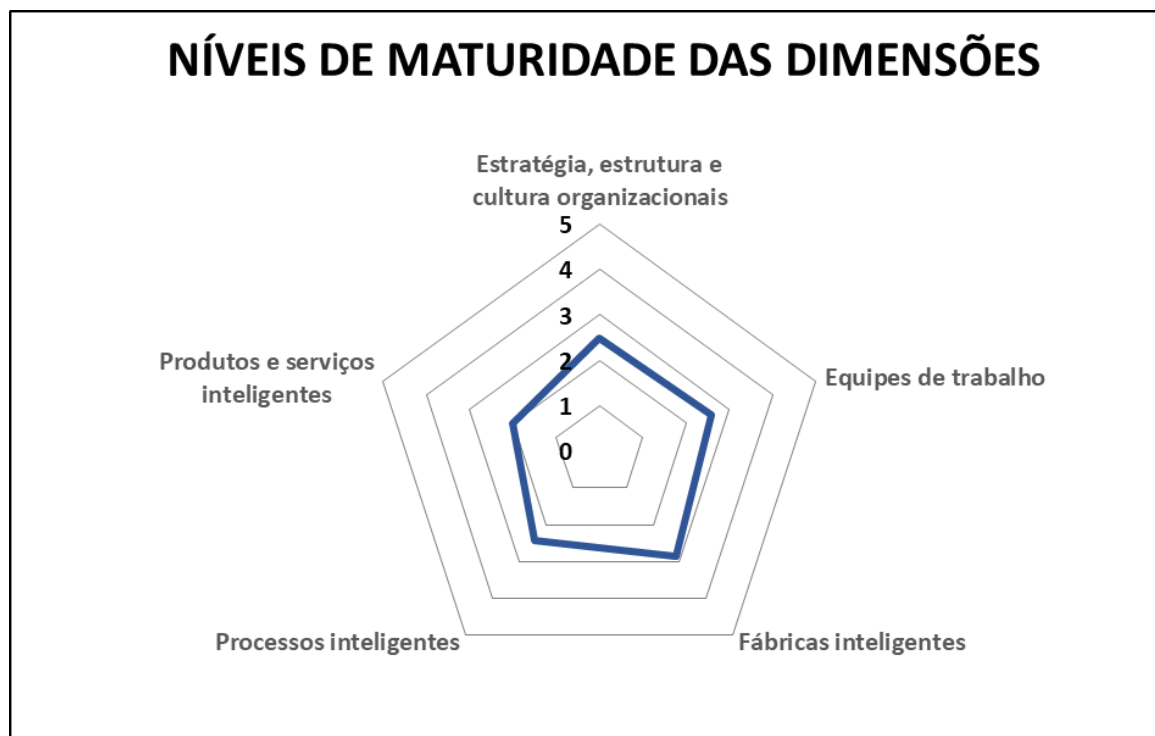


Figura 7 – Classificação de maturidade das dimensões da “empresa 1”

- **Resultado global da empresa 1**

EMPRESA 1	NÍVEL
Nível de maturidade global da empresa	<b>2,5</b>

A empresa 1, uma multinacional fabricante de pneus de automóveis, apresentou resultados intermediários, tendo obtido uma classificação global da empresa em 2,5. Quanto às avaliações das dimensões, pode ser observada uma classificação equitativa de maturidade, onde todas elas tiveram classificação entre 2 e 3.

A dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais” possui como pontos fortes as capacidades “Disponibilidade de recursos para realização das ações”, “Foco nos benefícios aos clientes”, “Colaboração com outras empresas da cadeia de valor”, e “Existência de coordenação central para a Indústria 4.0”. E possui como ponto fraco a capacidade “Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0”, que foi classificado como “0”.

A dimensão “Equipes de trabalho” apresentou uma boa classificação de maturidade, demonstrando que estão parcialmente presentes no quadro funcional as habilidades requeridas para o desenvolvimento das ações. Apenas a capacidade “Aquisição de habilidades” teve uma baixa classificação, que pode gerar duas possíveis interpretações: a empresa de fato dispõe das habilidades requeridas e assim não necessita grandes esforços de capacitação de pessoal, ou é uma ambiguidade, pois denota um baixo nível de atualização das habilidades dos funcionários.

A dimensão “Fábricas inteligentes” foi a melhor classificada, obtendo 2,9 e com diversas capacidades obtendo classificação 4, o que pressupõe que a fábrica é dotada de tecnologias de informação e comunicação bastante modernas e encontra-se em um nível avançado de integração de sistemas. Apenas as capacidades de “Equipamentos autônomos e inteligência artificial” e “Utilização de dispositivos móveis” apresentaram resultados baixos de maturidade. Considerando que são tecnologias de ponta e ainda emergentes, tornam-se oportunidades de melhoria para a empresa.

Na dimensão “Processos inteligentes”, semelhante ao observado na dimensão “Fábricas inteligentes”, os pontos fracos estão relacionados a processos autônomos, capacidade analítica de dados e inteligência artificial. Todos são conceitos e tecnologias marcantes da Indústria 4.0 e possuem um amplo espaço de desenvolvimento a nível tecnológico e em suas aplicações no ambiente fabril. De certa forma, é até esperado que as empresas ainda não estejam maduras nestas capacidades.

A dimensão “Produtos e serviços inteligentes” foi a que obteve menor classificação, sendo esta 2,0, uma vez que os produtos ainda não contam com sistemas embarcados, e portanto, também não dispõem das funcionalidades derivadas destas tecnologias, e da integração dos produtos com outros sistemas. Esta é considerada uma tecnologia muito relevante da Indústria 4.0 e uma fonte valiosa de novos serviços, e conseqüentemente novas receitas para as empresas.

A análise dos pontos fracos e dos pontos fortes das dimensões da “empresa 1” evidencia uma ambiguidade, pois a ausência de uma gestão estratégica para a operacionalização da Indústria 4.0 não possibilitaria a existência de uma coordenação central para a Indústria 4.0, e também seria incompatível com a disponibilização de recursos para as ações de transformação, que por sua vez contrasta com a baixa classificação na capacidade “Aquisição de habilidades”. As tecnologias inovadoras, como por exemplo sistemas e processos autônomos, a aplicação de inteligência artificial em equipamentos e nos produtos, podem ser grandes oportunidades de evolução da empresa, o que permite alcançar novos patamares de produtividade, integração, e um melhor relacionamento com os clientes, através de produtos conectados, gerando novas fontes de receita.

### 3.2.3.2. Relatório do teste piloto da “empresa 2”

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</b>	<b>0,6</b>	Análise dos impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa	<b>1</b>
		Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0	<b>0</b>
		Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0	<b>0</b>
		Gestão da inovação e uso de tecnologia	<b>0</b>
		Disponibilidade de recursos para realização das ações	<b>0</b>
		Foco nos benefícios aos clientes	<b>0</b>
		Colaboração com outras empresas da cadeia de valor	<b>3</b>
		Existência de coordenação central para a Indústria 4.0	<b>1</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Equipes de trabalho</b>	<b>1,8</b>	Habilidades existentes e requeridas	<b>3</b>
		Aquisição de habilidades	<b>3</b>
		Flexibilidade e autonomia das equipes	<b>0</b>
		Criatividade e enriquecimento do trabalho	<b>0</b>
		Abertura à inovação e responsividade à mudança	<b>3</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Fábricas inteligentes</b>	<b>1,9</b>	Modelagem digital de instalações e equipamentos	<b>2</b>
		Infraestrutura de equipamentos com sistemas embarcados	<b>2</b>
		Sistemas integrados de informação, comunicação e operação	<b>3</b>
		Aquisição de dados através de sensores e atuadores	<b>4</b>
		Equipamentos autônomos e inteligência artificial	<b>0</b>
		Layouts reconfiguráveis	<b>1</b>
		Utilização de dispositivos móveis	<b>1</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Processos inteligentes</b>	<b>2,3</b>	Uso da computação em nuvem	<b>3</b>
		Segurança dos ativos e proteção de dados	<b>4</b>
		Processos autônomos	<b>0</b>
		Compartilhamento ágil de informações	<b>4</b>
		Modelagem e simulação digitais de processos	<b>3</b>
		Computação visual e interfaces contextualizadas às tarefas	<b>2</b>
		Capacidade analítica de dados e inteligência artificial	<b>0</b>

DIMENSÃO	NÍVEL	CAPACIDADES	NÍVEL
<b>Produtos e serviços inteligentes</b>	<b>0,1</b>	Softwares embarcados nos produtos	<b>0</b>
		Análise de dados durante a fase de utilização do produto	<b>0</b>
		Oferta de serviços baseados em dados coletados	<b>0</b>
		Projeto e simulação digitais de produtos	<b>0</b>
		Segmentação e individualização de produtos e serviços	<b>0</b>
		Capacidade de reconfiguração ágil de produtos	<b>0</b>
		Integração dos produtos com outros sistemas	<b>1</b>

O gráfico da Figura 8 abaixo apresenta de forma resumida as classificações das dimensões abordadas na avaliação da “empresa “2”:



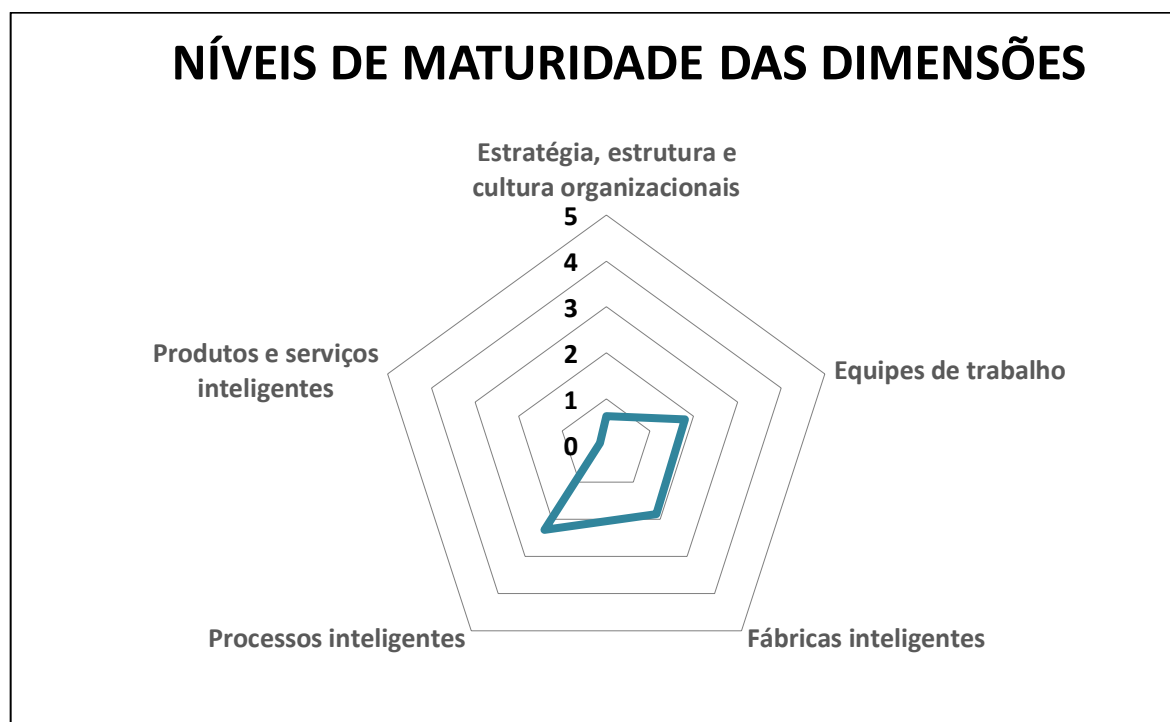


Figura 8 - Classificação de maturidade das dimensões da “empresa 2”

➤ **Resultado global da empresa 2**

EMPRESA 2	NÍVEL
Nível de maturidade global da empresa	1,3

A empresa 2 é uma multinacional montadora de automóveis entre as líderes mundiais, e a expectativa era de que o nível de maturidade fosse intermediário, considerando que a indústria automobilística costuma estar na vanguarda das inovações tecnológicas industriais. Porém, a classificação de maturidade global da empresa ficou em 1,3. Quanto à maturidade das dimensões, os resultados foram díspares, com algumas dimensões apresentando uma maturidade baixa se comparada à expectativa, e algumas dimensões com resultados que demonstram praticamente a ausência de adoção dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0.

A dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais” apresentou uma avaliação muito baixa, sinalizando que os respondentes avaliam que a alta administração não incorpora a Indústria 4.0 em suas análises de competitividade e ações de resposta. O que não significa que a empresa não possui um parque tecnológico adequado às suas atividades. Apenas a capacidade “Colaboração com outras empresas da cadeia de valor” apresentou um resultado intermediário, e as demais capacidades foram classificadas em 0 ou 1. Tais resultados podem levar a três interpretações: (1) a alta administração de fato não adota a Indústria 4.0 como fator de competição, (2) a composição do modelo, incluindo a formulação das questões e das capacidades, e a metodologia empírica utilizada, não possibilitaram a obtenção de informações mais precisas e realistas das práticas gerenciais, (3) houve uma falha de entendimento por parte dos respondentes dos principais conceitos e tecnologias abordados no modelo, levando a distorções na avaliação.

A dimensão “Equipes de trabalho” teve uma classificação intermediária, onde as capacidades “Habilidades existentes e requeridas” e “Aquisição de habilidades” foram bem avaliadas, e as capacidade relacionadas a autonomia, flexibilidade, e criatividade das equipes tiveram avaliação “0”. Tais avaliações permitem interpretar que o quadro de funcionários possui as habilidades necessárias para as ações de transformação e são responsivos às mudanças, mas os resultados sugerem que a estrutura organização é rígida, e não permite que as equipes possam tomar decisões rápidas e descentralizadas, e sejam geradoras de soluções autonomamente.

A dimensão “Fábricas inteligentes” apresentou um resultado baixo, frente à expectativa. Somente a capacidade “Aquisição de dados através de sensores e atuadores” apresentou um resultado alto. As capacidades que estão relacionadas a tecnologias da Indústria 4.0, como “Equipamentos autônomos e inteligência artificial”, “Layouts reconfiguráveis” e “Utilização de dispositivos móveis”, tiveram baixas avaliações, o que corrobora a análise da baixa aderência estratégica aos conceitos da Indústria 4.0.

A dimensão “Processos inteligentes” foi a melhor avaliada. As capacidades “Processos autônomos” e “Capacidade analítica de dados e inteligência artificial”, diretamente relacionadas a tecnologias inovadoras da Indústria 4.0, ainda não implantadas, tiveram avaliação “0”, o que sinaliza um amplo espaço de evolução para a obtenção de processos mais produtivos e descentralizados. As demais capacidades tiveram avaliações intermediárias e boas, com destaque para “Segurança dos ativos e proteção de dados” e “Compartilhamento ágil de informações”.

A dimensão “Produtos e serviços inteligentes” foi a de menor avaliação, com 6 das 7 capacidades sendo avaliadas em “0”, o que evidencia que os produtos não possuem sistemas embarcados e, portanto, também não possuem conectividade. Não são ofertados serviços complementares aos produtos, sendo uma oportunidade de conquista de mercado e introdução de novas funcionalidades nos produtos, que permitam a comunicação dos mesmos com os clientes, com a fábrica e com demais sistemas.

A partir dos resultados obtidos da avaliação da empresa 2, observa-se que ela possui uma análise crítica bastante rigorosa a respeito da implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, ao constatar-se a baixa avaliação em praticamente todas dimensões. Especificamente nas dimensões relacionadas à atuação da alta administração e da incorporação de tecnologias embarcadas nos produtos, percebe-se que há um amplo espaço de desenvolvimento de ações, que podem trazer benefícios tangíveis e intangíveis ao negócio. Também foi um importante ponto de observação que a estrutura organizacional foi avaliada como rígida, onde falta às equipes de trabalho autonomia e flexibilidade para participarem da criação de novas soluções. Mas um ponto positivo foi a avaliação de que as equipes possuem as habilidades requeridas para o processo de transformação para a Indústria 4.0, e são abertas a mudanças.

#### **3.2.4. Etapas 5 e 6 – Distribuição e manutenção do modelo**

Como este trabalho não teve objetivo de aplicar o modelo para avaliação de empresas, mas de apenas elaborá-lo e testá-lo, as fases 5 e 6, respectivamente de implementação e manutenção, não foram realizadas neste trabalho. A fase 5 refere-se à disseminação do modelo

junto ao público-alvo, e a fase 6 refere-se a manutenção e evolução do modelo ao longo do tempo, compreendendo a disponibilidade dos recursos físicos, humanos e tecnológicos necessários para a manutenção das ferramentas de apoio aos usuários, como páginas na internet para acesso ao modelo, *softwares*, caso o modelo tenha sido desenvolvido com base em programas, recursos de armazenamento de dados, atualização tecnológica, entre outros.



## 4. CONCLUSÕES

A Indústria 4.0 ainda é um tema emergente na literatura e nas aplicações industriais. Assim, a disponibilidade de publicações ainda é baixa se comparada a outros temas maduros na engenharia. Os conceitos e tecnologias abordados são de grande relevância para o setor produtivo mundial, e podem, a médio e longo prazos, alterar significativamente a competição entre as empresas e entre cadeias de valor. Novos negócios e novas profissões podem surgir devido às novas tecnologias suportadas pela evolução de *hardwares* e *softwares*, e os impactos que elas podem ter nas cadeias de valor são enormes, levando ao surgimento de muitas novas empresas e ao fechamento de outras tantas. Portanto, é fundamental que os governos e as empresas se preparem para as profundas mudanças nos ambientes de negócios, e disponham de ferramentas práticas e robustas para avaliarem a maturidade na implementação destes conceitos e tecnologias.

Através da revisão bibliográfica, pôde ser constatado que há uma convergência a respeito das principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, que foram consolidadas ao longo das últimas décadas, e que suportam as novas aplicações industriais. Podem ser citados os sistemas ciber-físicos (CPS), a internet das coisas (*internet of things*), a computação em nuvem, o *Big Data Analytics*, a arquitetura orientada a serviços, os sistemas autônomos e inteligentes, a manufatura aditiva (impressão 3D), os dispositivos móveis e suas aplicações. Junto da evolução das tecnologias emergentes, também evoluíram diversos conceitos relacionados à quarta revolução industrial. Dentre os principais estão a customização da demanda, a digitalização dos processos de negócio, incluindo os processos de desenvolvimento de produtos, de fabricação, e de entrega, a conectividade entre as máquinas e demais sistemas empresariais, e com ela a descentralização das decisões, realizadas por sistemas autônomos, o aumento da capacidade analítica de dados em tempo real, a transitoriedade das tecnologias, que são rapidamente superadas, a digitalização de produtos, suportada por sistemas embarcados inteligentes e de tecnologias de conectividade, e a reconfigurabilidade ágil de *layouts*.

Como afirmam Donovan et al. (2016), existem muitos desafios associados ao desenvolvimento de capacidades analíticas industriais, incluindo o gerenciamento de tecnologias e plataformas heterogêneas, formação de equipes multidisciplinares, capacitações, entre outros. Alguns desafios são amplificados quando não existem métodos para medir o nível de capacidade atual, e identificar estrategicamente as áreas que necessitam de melhorias. Foi onde este trabalho focou, no desenvolvimento de uma ferramenta para quantificar a maturidade no uso de capacidades analíticas industriais.

Foram enunciados como objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver um modelo de avaliação do nível de maturidade na implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0;
- Analisar e comparar o grau de evolução das empresas avaliadas, a partir de avaliações empíricas;
- Gerar conclusões a respeito dos impactos esperados pela utilização dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, bem como das dificuldades de implementação, fundamentadas no estudo empírico.

Com relação aos objetivos propostos, o desenvolvimento do modelo foi concretizado. A partir dos resultados obtidos na pesquisa empírica, foram feitas análises descritivas. Não foi possível a realização de análises comparativas, devido às heterogeneidades das empresas, por serem de diferentes segmentos, diferentes portes, com diferentes produtos e perfis culturais. Apenas com a disseminação do modelo, que não fez parte do escopo do trabalho, se conseguirá fazer as análises comparativas da maturidade de empresas. Também não era escopo do trabalho gerar recomendações de ações de melhoria nas empresas analisadas, pois esta abordagem necessitaria de outros métodos de pesquisa.

O modelo desenvolvido mostra que a implementação da Indústria 4.0 nas empresas exige uma visão holística, incluindo uma nova orientação estratégica, o desenvolvimento de novas competências da força de trabalho, a adaptação dos modelos de negócio pelo desenvolvimento de novos produtos e serviços com novas funcionalidades customizadas, além da implementação das tecnologias habilitadoras.

O modelo é aplicável a diversos setores industriais, e em empresas de variados portes. A pesquisa empírica limitou-se a um teste piloto realizado em apenas duas empresas, e apenas no setor automobilístico. Portanto, possui um grande potencial para trabalhos futuros, sejam eles acadêmicos, científicos e empresariais. As aplicações acadêmicas podem ser em cursos de pós-graduação como mestrados e doutorados, com a aplicação do modelo de forma qualitativa ou quantitativa, a fim de possibilitar inferências e conclusões que não foram possíveis neste trabalho. As aplicações científicas podem ser publicações de artigos em jornais, revistas e congressos especializados em diversos domínios do conhecimento, devido à transversalidade da Indústria 4.0. As aplicações empresariais são possíveis em empresas de diversos setores industriais, ou mesmo por empresas de consultoria que queiram usar o modelo para realizar um diagnóstico da maturidade da Indústria 4.0 em empresas clientes. O modelo pode ser útil para avaliar a maturidade atual da empresa, e também para planejar e definir a maturidade futura desejada. É esperado que ele possa auxiliar as empresas na identificação das ações necessárias que maximizem os benefícios econômicos da Indústria 4.0 e da digitalização de produtos e processos, a fim de aumentarem sua competitividade e lucratividade, através do maior conhecimento das necessidades dos consumidores, e do aumento da capacidade de responder de forma ágil e econômica a estas necessidades. Como referência da utilidade do modelo proposto para as empresas, a Iniciativa Portugal i4.0 possui como uma das medidas o desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade semelhante.

Este trabalho tem, como todos os outros, algumas limitações. Em primeiro lugar a validação do modelo, que poderia ter sido feita junto a um maior número de profissionais, com maior diversidade de experiências, abrangendo empresas de diferentes setores, portes e contextos culturais. Outra limitação é referente ao teste piloto, que também poderia ter sido realizado com um número maior de empresas, o que permitiria comparações e análises mais elaboradas. Por uma questão de conveniência, e pelo acesso às empresas, o teste piloto para exemplificação da aplicação do modelo e verificação de sua usabilidade e adequação de forma e conteúdo, foi realizado nas mesmas empresas que participaram da validação do mesmo. O fato de também não ter havido contribuições significativas de melhoria incorporadas ao modelo, sugere três possibilidades: (a) o modelo foi bem desenvolvido e não necessitou de grandes melhorias, (b) os profissionais respondentes não possuíam uma especialização na Indústria 4.0

o suficiente para gerar contribuições mais impactantes para o modelo, ou (3) o número de empresas intervenientes foi insuficiente para a validação do modelo. Um objetivo inicial do projeto era a aplicação do modelo em determinada empresa que possuísse unidades produtivas no Brasil e em Portugal. Tal avaliação não ocorreu, por questões diversas relacionadas ao atraso na elaboração do modelo, e à ausência de retorno de algumas empresas contatadas para este fim.

Análises comparativas de maturidade podem ser uma possibilidade de trabalho futuro, e serviriam para reforçar a validade do modelo em empresas de diferentes setores e contextos culturais. O autor julga, porém, que foram válidos os testes piloto realizados, e um possível enviesamento que possa ter ocorrido por parte das empresas, por também terem colaborado para a validação do modelo, não é considerado relevante para alterar de forma significativa os resultados obtidos. Dado o exposto acima, para que o modelo desenvolvido possa ser utilizado em trabalhos acadêmicos futuros com o objetivo de recolher evidências e realizar inferências a partir de comparações, será necessário fazer a sua validação empírica utilizando métodos quantitativos, onde o modelo possa ser enviado a um número maior de empresas, a fim de que essa amostra seja representativa da população a que pertence, e fundamente conclusões mais objetivas. Para tal, o questionário de avaliação de maturidade deverá ser disponibilizado *online* nas línguas inglesa e portuguesa.

A Indústria 4.0 produzirá impactos que irão muito além dos processos produtivos, sendo uma verdadeira revolução no mundo dos negócios. Apesar da pequena amostra de empresas que validaram o modelo, pôde-se verificar que os possíveis impactos citados por elas, estão de acordo com o verificado na revisão bibliográfica. Para que as mudanças esperadas no contexto industrial e dos serviços aconteçam, será necessária uma alteração dos sistemas de educação, como política de governo, especialmente nos países em desenvolvimento, para enfrentamento das mudanças demográficas, e das necessidades de novas competências dos trabalhadores. Serão necessários investimentos em materiais, laboratórios e profissionais capacitados para aprofundarem as pesquisas das aplicações das tecnologias nos ambientes industriais e de serviços de alta tecnologia. As parcerias público-privadas são de grande importância, pois é o setor privado que impulsiona a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, de acordo com a necessidade dos consumidores e com as oportunidades de melhoria de qualidade, aumento de produtividade e redução de custos na cadeia de valor dos produtos e serviços.

Por fim, uma sugestão deste trabalho, a partir da revisão bibliográfica realizada, é a criação de fábricas de aprendizagem (*learning factories*), também denominados como ambientes de demonstração (*testbeds*) em universidades, em instituições públicas e privadas de pesquisa, desenvolvimento e inovação, e em empresas, para testarem novos métodos e novas tecnologias aplicadas aos diversos negócios. Permitem menores custos de adaptação de processos, sem interferência no processo produtivo e logístico, evitando atrasos nas entregas, utilização não prevista de recursos e falhas nos produtos devido às modificações no processo. Também possibilitam a troca de informações entre diferentes organizações, com competências complementares, o que permite absorverem as melhores práticas e assimilarem o conhecimento já desenvolvido. Após validadas, podem ser implementadas diretamente nas linhas de produção com planeamento e segurança.





---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albers, A., Gladysz, B., Pinner, T., Butenko, V., & Stürmlinger, T. (2016). Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems. *Procedia CIRP*, 52, 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.067>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 1622–1627. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.318>
- CNI - Confederação Nacional da Indústria. Desafios para a indústria 4.0 no Brasil. Brasília: CNI, 2016a.
- CNI - Confederação Nacional da Indústria (2016b). Sondagem especial – Indústria 4.0. Disponível em: <[https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer\\_public/e0/aa/e0aabd52-53ee-4fd8-82ba-9a0ffd192db8/sondespecial\\_industria40\\_abril2016.pdf](https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/e0/aa/e0aabd52-53ee-4fd8-82ba-9a0ffd192db8/sondespecial_industria40_abril2016.pdf)>. Acesso em 23/05/2017.
- COTEC Portugal (2017). Iniciativa Portugal i4.0. Disponível em: <[http://www.industria4-0.cotec.pt/files/industria4\\_0medidas-pt.pdf](http://www.industria4-0.cotec.pt/files/industria4_0medidas-pt.pdf)>. Acesso em 18/03/2017.
- Daudt, G. M.; Willcox, L. D. (2016). Reflexões críticas a partir das experiências dos Estados Unidos e da Alemanha em manufatura avançada. *BNDES Setorial*, n. 44, p.[5]-45. Rio de Janeiro.
- De Bruin, T., Freeze, R., Kaulkarni, U., & Rosemann, M. (2005). Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. *Australasian Conference on Information Systems (ACIS)*, (January), 8–19. <https://doi.org/10.1108/14637151211225225>
- De Carolis, A., Tavola, G., & Taisch, M. (2017). Gap Analysis on Research and Innovation for Cyber-Physical Systems in Manufacturing. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 640, pp. 61–70). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51100-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51100-9_6)
- De Souza, T. F., & Gomes, C. F. S. (2015). Assessment of maturity in project management: A bibliometric study of main models. *Procedia Computer Science*, 55, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.012>

- Donovan, P. O., Sullivan, D. T. J. O., & Bruton, K. (2016). IAMM: A Maturity Model for Measuring Industrial Analytics Capabilities in Large-scale Manufacturing Facilities. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 7(32), 1–11.
- ElMaraghy, H., & ElMaraghy, W. (2016). Smart Adaptable Assembly Systems. *Procedia CIRP*, 44, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.107>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CIRP*, 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Esmailian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39, 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- European Parliament (2015). Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS\\_BRI\(2015\)568337\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf). Acesso em: 24 de maio de 2017.
- FoF - Factories 4.0 and Beyond (2016). Disponível em: [http://effra.eu/sites/default/files/factories40\\_beyond\\_v31\\_public.pdf](http://effra.eu/sites/default/files/factories40_beyond_v31_public.pdf). Acesso em 06/11/2017.
- FoF - Factories of the Future. Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020 (2013). Disponível em: [http://effra.eu/sites/default/files/factories\\_of\\_the\\_future\\_2020\\_roadmap.pdf](http://effra.eu/sites/default/files/factories_of_the_future_2020_roadmap.pdf). Acesso em 06/11/2017.
- Foresight (2013). The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK - Project Report. *The Government Office for Science, London*.
- Goksen, Y., Cevik, E., & Avunduk, H. (2015). A Case Analysis on the Focus on the Maturity Models and Information Technologies. *Procedia Economics and Finance*, 19, 208–216. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00022-2)
- Gunes, V., Peter, S., Givargis, T., & Vahid, F. (2014). A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 8(12), 4242–4268. <https://doi.org/10.3837/tiis.2014.12.001>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (Vol. 2016–March, pp. 3928–3937). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>

- 
- IIC - Industrial Internet Consortium (2017). Disponível em  
<<http://www.iiconsortium.org/about-us.htm>>. Acesso em 29/05/2017.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. *Acatech*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1205.8966>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., ... Noh, S. Do. (2016). Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC–PapersOnLine*, 48(3), 1870–1875. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359>
- Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 7543(August), 1–10. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., ... Schröter, M. (2015). IMPULS - Industrie 4.0 Readiness. *Aachen, Cologne: VDMA's IMPULS-Foundation*.
- Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços – MDIC; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC (2016). Perspectivas de especialistas brasileiros sobre a manufatura avançada no Brasil. Disponível em:  
<<https://pt.slideshare.net/mdicgovbr/perspectivas-de-especialistas-sobre-a-manufatura-avanada-no-brasil-2016>>. Acesso em 25/08/2017.
-

- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>
- National Science and Technology Council. (2016). National Network For Manufacturing Innovation Program – Strategic Plan. Disponível em: <<https://www.manufacturingusa.com/sites/all/assets/content/2015-NNMI-Strategic-Plan.pdf>>. Acesso em 17/08/2017.
- Poovendran, R. (2010). Cyber-physical systems: close encounters between two parallel worlds. *Proceedings of the IEEE*, 98(8), 1363–1366. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2050377>
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). How smart, connected products are transforming companies. *Harvard Business Review*, 2015(October). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., de Amicis, R., ... Vallarino, I. (2015). Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(2), 26–40. <https://doi.org/10.1109/MCG.2015.45>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Rennung, F., Luminosu, C. T., & Draghici, A. (2016). Service Provision in the Framework of Industry 4.0. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221, 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.127>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0. Disponível em: [https://www.bcgperspectives.com/Images/Industry\\_40\\_Future\\_of\\_Productivity\\_April\\_2015\\_tcm80-185183.pdf](https://www.bcgperspectives.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm80-185183.pdf). Acesso em 21/08/2017.
- Scheuermann, C., Verclas, S., & Bruegge, B. (2015). Agile Factory - An Example of an Industry 4.0 Manufacturing Process. In *Proceedings - 3rd IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications* (Vol. 2008, pp. 43–47). <https://doi.org/10.1109/CPSNA.2015.17>
- Schmitt, M., Meixner, G., Gorecky, D., Seissler, M., & Loskyll, M. (2013). Mobile interaction technologies in the factory of the future. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online)*, 46, pp. 536–542. <https://doi.org/10.3182/20130811-5-US-2037.00001>

- 
- Schuh G., Reuter C., Hauptvogel A., Dölle C. (2015) Hypotheses for a Theory of Production in the Context of Industrie 4.0. In: Brecher C. (eds) *Advances in Production Technology. Lecture Notes in Production Engineering*, 11-23. Springer, Cham.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., & Wahlster, W. (2017). Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies (acatech STUDY). Munich: *Herbert Utl Verlag*.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. R., & Prote, J. P. (2014). Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 19(C), 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.016>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schwab, K. The fourth industrial Revolution. Geneva: *World Economic Forum*, 2016.
- Song, Z., & Moon, Y. (2017). Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8), 1365–1382. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9428-0>
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40(Icc), 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-Defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. In *Procedia CIRP*, 52, pp. 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- Tonelli, F., Demartini, M., Loleo, A., & Testa, C. (2016). A Novel Methodology for Manufacturing Firms Value Modeling and Mapping to Improve Operational Performance in the Industry 4.0 Era. *Procedia CIRP*, 57, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.022>
- Vogel-Heuser, B., & Hess, D. (2016). Guest Editorial Industry 4.0 - Prerequisites and Visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 411–413. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>
- Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
-

- Xu, L. Da, He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233–2243.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>
- Zhou, K., Liu, T., & Liang, L. (2016). From cyber-physical systems to Industry 4.0: make future manufacturing become possible. *International Journal of Manufacturing Research*, 11(2), 167–188.

## ANEXO I – CAPACIDADES DE TRANSFORMAÇÃO – DESCRIÇÃO E RELAÇÃO COM CONCEITOS E TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Tabela 15 – Capacidades da dimensão “Estratégia, estrutura e cultura organizacionais”

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Análise dos impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa</b>	É fundamental a alta administração avaliar os impactos que os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 têm para a competitividade da empresa, a fim de que as ações estratégicas e os investimentos sejam proporcionais aos impactos analisados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mapeamento de valor adicionado pelas tecnologias</li> </ul>
<b>Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0</b>	A alta administração deve assumir o papel de reformular e gerenciar a estratégia para implementação da Indústria 4.0, atribuindo as responsabilidades, aprovando os investimentos, disponibilizando recursos, e direcionando as ações necessárias para o desdobramento dos objetivos estratégicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estratégia competitiva</li> <li>▪ Adequação do modelo de negócios</li> </ul>
<b>Investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0</b>	Os investimentos nas tecnologias a serem implementadas devem trazer benefícios econômicos diretos e indiretos para a empresa, necessitando de uma cuidadosa orçamentação, e eficiente alocação de recursos financeiros entre as áreas funcionais, a fim de que evoluam de forma equilibrada e harmoniosa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eficiência na utilização dos recursos</li> </ul>
<b>Gestão da inovação e uso de tecnologias</b>	A inovação e o uso intensivo de tecnologias de informação e operação, são os pontos centrais da Indústria 4.0, e necessitam ser constantemente gerenciadas para que sejam extraídos os máximos benefícios e mitigados os riscos da implementação.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inovação de produtos e processos</li> </ul>
<b>Disponibilidade de recursos para realização das ações</b>	A empresa deve tratar a transformação para a Indústria 4.0 como um projeto de longo prazo, e disponibilizar os recursos necessários ao longo do tempo, como os recursos humanos, materiais, tempo, equipamentos, e considerá-los em seu planejamento estratégico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eficiência na utilização dos recursos</li> </ul>
<b>Foco nos benefícios aos clientes</b>	A empresa deve buscar conhecer ao máximo as preferências dos clientes e as condições de uso dos produtos, e utilizar estas informações para encurtar o tempo de lançamento de produtos, fortalecer a comunicação com os clientes, e segmentar ou individualizar os produtos e serviços.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Segmentação e individualização da demanda</li> <li>▪ Customização em massa</li> <li>▪ Time to market</li> </ul>

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Colaboração com outras empresas da rede de valor</b>	A Indústria 4.0 vai além das fronteiras da empresa, e busca a integração horizontal ao longo da cadeia de valor, desde a aquisição de matéria-prima até a desativação dos produtos, com objetivo de reduzir custos e prazos de fornecimento, otimizar as operações logísticas e comerciais, fortalecendo a competitividade da cadeia de valor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalização dos processos</li> <li>▪ <i>Lean agile Value Chain</i></li> <li>▪ <i>Time to market</i></li> <li>▪ Colaboração</li> </ul>
<b>Existência de coordenação central para a Indústria 4.0</b>	Por tratar-se de um projeto estratégico e de longo prazo, é importante que haja uma coordenação central das ações da Indústria 4.0, como um Escritório de Gerenciamento de Projetos direcionado à inovação, que coordene as ações das diversas áreas departamentais e funcionais, e parceiros envolvidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Integração vertical e horizontal</li> </ul>

Tabela 16 – Capacidades da dimensão “Equipes de trabalho”

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Habilidades existentes e requeridas</b>	A empresa necessita conhecer quais os conhecimentos e habilidades são existentes na empresa, e quais são requeridas, para entender as lacunas de qualificação e poder tomar as ações para suprir as necessidades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gestão do conhecimento</li> <li>▪ Gestão estratégica</li> </ul>
<b>Aquisição de habilidades</b>	A aquisição de habilidades pode se dar através de treinamentos dos empregados ou da contratação de serviços externos especializados. Cada qual possui vantagens e desvantagens que precisam ser analisadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Qualificação da força de trabalho</li> </ul>
<b>Flexibilidade e autonomia das equipes</b>	As equipes devem ser flexíveis para realizarem funções diversas, e devem possuir a autonomia e autoridade necessárias para responderem de forma ágil às mudanças de contexto, com polivalência de funções e qualificação técnica multidisciplinar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Multidisciplinaridade das tecnologias</li> <li>▪ Polivalência funcional</li> </ul>
<b>Criatividade e enriquecimento do trabalho</b>	Com a evolução e barateamento das tecnologias de operação, equipamentos eletromecânicos e sistemas autônomos substituirão os humanos em grande parte das atividades repetitivas, dando lugar a atividades mais criativas e integrativas, com consequente enriquecimento do conteúdo do trabalho.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aumento de atividades criativas</li> <li>▪ Interação homem-máquina</li> <li>▪ Produtividade</li> </ul>
<b>Abertura à inovação e responsividade à mudança</b>	As equipes devem estar abertas às inovações tecnológicas e preparadas para as mudanças de contexto, originadas internamente ou externamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rápidas mudanças de contexto</li> </ul>



Tabela 17 – Capacidades da dimensão “Fábricas inteligentes”

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Modelagem digital de instalações e equipamentos</b>	A modelagem digital das instalações e dos equipamentos possibilita a integração com outros elementos internos e externos às fábricas, o monitoramento e atuação remotos, e uma rápida modificação de suas configurações, face às mudanças de contexto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalização</li> <li>▪ CPS</li> </ul>
<b>Infraestrutura de equipamentos com sistemas embarcados</b>	Equipamentos dotados de sistemas embarcados, tais como sensores, atuadores, e ferramentas de produção, permitem a conectividade e interoperabilidade, que são condições necessárias para a descentralização e automação das operações.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CPS</li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ <i>Cloud computing</i></li> <li>▪ Descentralização</li> </ul>
<b>Sistemas integrados de informação, comunicação, e operação</b>	A integração dos sistemas de informação, comunicação, e operação, é fundamental para a aumentar a capacidade analítica de dados, além da descentralização, redução dos tempos de reação, aumento da confiabilidade e da produtividade dos processos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Interoperabilidade</li> <li>▪ <i>Cloud computing</i></li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ Fonte centralizada de informações</li> </ul>
<b>Aquisição de dados através de sensores e atuadores</b>	Uma das mudanças de paradigma da Indústria 4.0 é a valorização do aprendizado baseado em dados, obtidos de diversas fontes como sensores e atuadores, que os enviam aos sistemas de processamento, substituindo as decisões baseadas na experiência pelas decisões derivadas dos dados, mais precisas e realísticas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Big Data</i></li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> <li>▪ <i>Data Mining</i></li> </ul>
<b>Equipamentos autônomos e inteligência artificial</b>	De posse dos dados dos processos de entrada, os equipamentos devem comunicar-se entre si, com os produtos, com as instalações, com os humanos e de forma descentralizada e autônoma, tomar decisões baseadas nos dados. Mecanismos de aprendizagem de máquinas, ou inteligência artificial, contribuem para o contínuo aperfeiçoamento das decisões e minimização de falhas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Descentralização</li> <li>▪ Inteligência artificial</li> <li>▪ Adaptabilidade</li> <li>▪ Flexibilidade</li> </ul>
<b>Layouts reconfiguráveis</b>	A rápida reconfiguração de <i>layouts</i> adiciona flexibilidade e agilidade para adaptações ao contexto de volume e variedades de produtos, permitindo a customização em massa da produção e aumentando a produtividade.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CPS</li> <li>▪ Auto-otimização</li> <li>▪ Customização em massa</li> <li>▪ Adaptabilidade</li> <li>▪ Flexibilidade</li> <li>▪ Escalabilidade</li> </ul>

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Utilização de dispositivos móveis</b>	A utilização de dispositivos móveis, conectados à nuvem e aos sistemas de informação e operação, adiciona flexibilidade e mobilidade, e permite a operação descentralizada e remota dos processos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CPS</li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ <i>Cloud computing</i></li> <li>▪ Descentralização</li> <li>▪ Flexibilidade</li> </ul>

Tabela 18 – Capacidades da dimensão “Processos inteligentes”

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Uso da computação em nuvem</b>	A computação em nuvem ( <i>cloud computing</i> ), provê capacidades de armazenamento e processamento remotos, possibilitando a descentralização dos processos, redução de espaço físico, redução de complexidade de equipamentos e maior proteção dos dados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Cloud computing</i></li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ Descentralização</li> <li>▪ Flexibilidade</li> <li>▪ Fonte centralizada de informações</li> </ul>
<b>Segurança dos ativos e proteção de dados</b>	A interação entre humanos e máquinas necessita de políticas e mecanismos que garantam a integridade física dos mesmos, e de práticas que busquem a proteção e privacidade dos dados a fim de não serem usados de forma prejudicial aos interesses da empresa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Interação homem-máquina</li> <li>▪ Proteção de dados</li> <li>▪ Integridade de ativos e segurança</li> </ul>
<b>Processos autônomos</b>	A capacidade analítica de dados e a inteligência artificial, combinados com outras tecnologias, permitem a automação, descentralização e flexibilidade dos processos, contribuindo para o aumento da produtividade e escalabilidade dos mesmos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autonomia</li> <li>▪ Aprendizagem de máquinas</li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> <li>▪ Descentralização</li> </ul>
<b>Modelagem e simulação digitais de processos</b>	A modelagem e simulação digitais dos processos permite a operação e monitoramento remoto dos processos físicos, redução do tempo de preparação e testes, além da rápida reconfiguração dos processos. A computação visual melhora significativamente a interface homem-máquina, aumentando a produtividade e reduzindo perdas nas operações.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalização</li> <li>▪ CPS</li> <li>▪ Produtividade</li> <li>▪ Computação visual e interfaces</li> <li>▪ <i>Time to market</i></li> </ul>
<b>Compartilhamento ágil de informações</b>	O compartilhamento ágil de informações internamente e com os parceiros externos, aumenta a eficiência da cadeia de valor, reduzindo prazos dos processos, aumentando a assertividade da comunicação e reduzindo perdas por obsolescência ou atrasos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Integração vertical e horizontal</li> <li>▪ <i>Time to Market</i></li> <li>▪ Colaboração</li> </ul>

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Computação visual e interfaces contextualizadas às tarefas</b>	A computação visual, através de sistemas de realidade virtual e aumentada, sistemas supervisórios, interfaces contextualizadas às tarefas, e funcionalidades adicionadas a dispositivos móveis, podem proporcionar grandes contribuições às atividades, fazendo uma interface entre o mundo real e o mundo virtual, auxiliando os humanos a identificarem, analisarem e processarem informações para uma tomada de decisão mais ágil e mais precisa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalização</li> <li>▪ Computação visual e interfaces</li> <li>▪ Descentralização</li> <li>▪ Interação homem-máquina</li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> </ul>
<b>Capacidade analítica de dados e inteligência artificial</b>	O grande volume de dados e de variadas fontes, torna necessária a existência de processos analíticos robustos, para produzir informações contextualizadas e em tempo real, para a rápida e assertiva tomada de decisões. A inteligência artificial contribui para o contínuo aperfeiçoamento das informações e para a descentralização dos processos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Big Data</i></li> <li>▪ <i>Data Mining</i></li> <li>▪ Inteligência artificial</li> <li>▪ Descentralização</li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> </ul>

*Tabela 19 – Capacidades da dimensão “Produtos e serviços inteligentes”*

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Softwares embarcados nos produtos</b>	A instalação de sistemas embarcados nos produtos permite a conectividade dos mesmos com outros sistemas de comunicação e operação, com outros produtos, e com os clientes, possibilitando a obtenção de dados em tempo real e a oferta de serviços complementares aos clientes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CPS</li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ Arquitetura orientada a serviços</li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> </ul>
<b>Análise de dados durante a fase de utilização do produto</b>	A análise das condições de uso dos produtos pelos clientes, gera informações que podem ser utilizadas pela empresa para orientar o cliente quanto ao melhor uso, propor serviços e produtos adicionais, monitorar o desempenho do produto face às especificações. Tudo isso aumenta a confiabilidade, disponibilidade e eficácia dos produtos, além de proporcionar novas fontes de receitas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Individualização de produtos</li> <li>▪ Conectividade</li> <li>▪ Arquitetura orientada a serviços</li> </ul>
<b>Oferta de serviços baseados em dados coletados</b>	Os dados coletados através das vendas, das condições de uso dos produtos e das preferências dos clientes, permitem à empresa ofertar serviços agregados aos produtos. Esta é uma tendência fortalecida pelas novas tecnologias de comunicação, e amplia a visão de empresas vendedoras de produtos para empresas provedoras de soluções.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arquitetura orientada a serviços</li> <li>▪ Decisões baseadas em dados</li> </ul>

CAPACIDADES	DESCRIÇÃO	CONCEITOS E TECNOLOGIAS
<b>Projeto e simulação digitais de produtos</b>	A digitalização do projeto dos produtos traz benefícios como a transmissão informatizada de dados para a produção, possibilita reconfigurações e atualizações mais rápidas, facilita a troca de informações com parceiros externos, e permite a virtualização dos produtos no ambiente fabril e nas aplicações do cliente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalização</li> <li>▪ <i>Time to market</i></li> <li>▪ Integração ao longo do ciclo de vida dos produtos</li> </ul>
<b>Segmentação e individualização de produtos e serviços</b>	A segmentação, e quando possível individualização dos produtos, através da fabricação de lotes unitários, atende a premissa de customização da demanda, cada vez mais frequente. É possibilitada pela flexibilidade e agilidade das tecnologias de comunicação e operação.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Customização em massa</li> <li>▪ Adaptabilidade</li> <li>▪ <i>Time to Market</i></li> <li>▪ Flexibilidade</li> </ul>
<b>Capacidade de reconfiguração ágil de produtos</b>	A reconfiguração ágil dos produtos é condição para o rápido atendimento de variações de volume e variedade de demanda, e adiciona benefícios de integração ao longo da cadeia de valor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Time to market</i></li> <li>▪ Customização em massa</li> <li>▪ Adaptabilidade</li> <li>▪ Flexibilidade</li> </ul>
<b>Integração dos produtos em outros sistemas</b>	Os produtos inteligentes, conectados às instalações e equipamentos, formam uma rede de informações em tempo real, ou internet das coisas, alimentando diversos processos de negócio, desde a concepção e projeto, até a desativação dos mesmos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CPS</li> <li>▪ Interoperabilidade</li> <li>▪ IoT</li> <li>▪ Rastreabilidade</li> <li>▪ Integração vertical e horizontal</li> </ul>

## ANEXO II – QUESTÕES ORIENTADORAS DA AVALIAÇÃO

Para orientar as respostas das questões utilizadas para a avaliação, e de outras que possam ser adicionadas ao questionário, são sugeridos seis níveis de avaliação de maturidade, que são padronizados. Devem ser interpretados conforme a abrangência e extensão dos conceitos e tecnologias relacionados a cada pergunta, como segue abaixo:

Nível 0 – Baixo ou nenhum grau de implementação

Nível 1 – Em planejamento ou desenvolvimento de ações piloto

Nível 2 – Inicia a implementação de ações, com alguns benefícios observados

Nível 3 – Implementação parcial de ações, que elevam a competitividade da empresa

Nível 4 – Implementação avançada de ações, com claros retornos econômicos

Nível 5 – Referência na aplicação dos conceitos e implementação de tecnologias da Indústria 4.0

### **1. Estratégia, estrutura e cultura organizacionais**

1.1. Analisa continuamente os impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa a médio e longo prazos?

1.2. Incorpora os conceitos e das tecnologias da Indústria 4.0 como principais fatores na estratégia de competição?

1.3. Possui indicadores apropriados para monitorar o desdobramento das ações da Indústria 4.0 com objetivos e metas realistas?

1.4. Planeja e realiza os investimentos necessários para implementar as tecnologias da Indústria 4.0?

1.5. Possui uma estrutura organizacional orientada à inovação e incorporação de novas tecnologias?

1.6. A alta administração e gerências disponibilizam os recursos necessários para a realização das ações de transformação?

1.7. É realizada comunicação ágil e digitalizada com os clientes para aquisição de informações?

1.8. As ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0 possuem como foco os requisitos do cliente?

1.9. Há compartilhamento das informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor, para uma ágil tomada de decisões?

1.10. Existe uma coordenação central para as ações de transformação da Indústria 4.0?

## **2. Equipes de trabalho**

- 2.1. Possui as habilidades técnicas e gerenciais requeridas para implementar as ações da Indústria 4.0?
- 2.2. Realiza as capacitações necessárias para a aquisição de habilidades técnicas e gerenciais relacionadas aos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0?
- 2.3. A estrutura organizacional e a sistemática de aprovação de decisões promovem a flexibilidade e autonomia das equipes?
- 2.4. Incentiva a criatividade e empoderamento dos empregados face aos desafios e benefícios da transformação digital?
- 2.5. É observada a abertura dos empregados à inovação e ao aprendizado contínuo, com uma atuação responsiva às mudanças de contexto?

## **3. Fábricas inteligentes**

- 3.1. As instalações fabris, e os equipamentos de produção possuem cópias digitais, que reproduzam virtualmente o mundo físico?
- 3.2. Existe atualização bidirecional de informações entre as instalações e equipamentos reais, e as cópias digitais?
- 3.3. A infraestrutura de equipamentos e instalações possui sistemas embarcados, que possibilitam o processamento de dados, e a comunicação entre si e com outros sistemas?
- 3.4. Os sistemas de informação, comunicação e operação, são integrados e capazes de atender os requisitos de interoperabilidade?
- 3.5. São adquiridos dados a partir de sensores e atuadores, de forma automatizada e em tempo real?
- 3.6. Os equipamentos são dotados de tecnologias de inteligência artificial, que possibilitam o contínuo aperfeiçoamento, capacitando-os a tomarem decisões de autonomamente?
- 3.7. Os layouts de produção são reconfiguráveis de forma ágil, para atender às variações de diversificação e volume na oferta de produtos individualizados?
- 3.8. São utilizados dispositivos móveis inteligentes, para flexibilizar e otimizar as operações?

## **4. Processos inteligentes**

- 4.1. São utilizadas tecnologias de hardwares e softwares para armazenamento e processamento de dados em nuvem?
- 4.2. São utilizadas tecnologias e sistemáticas de segurança e integridade física dos ativos e dos empregados, e de proteção de dados contra roubos e utilização indevida?
- 4.3. Os processos produtivos são capazes de operar de forma autônoma, auxiliados por sistemas de aprendizagem de máquinas?

- 4.4. Os principais processos de negócio são projetados para uma partilha ágil de informações, internamente na empresa e com os demais parceiros do negócio?
- 4.5. Os principais processos de negócio são digitalizados e incorporados em sistemas integrados de informação e comunicação?
- 4.6. Os principais processos possuem recursos digitais de modelagem e simulação do desempenho?
- 4.7. São utilizados recursos de computação visual, tais como sistemas supervisórios, sistemas de realidade virtual e aumentada, para auxiliar as operações?
- 4.8. Os recursos de computação visual entregam informações e interfaces contextualizadas às tarefas?
- 4.9. Os principais processos são auxiliados por sistemas de mineração de dados para processar grandes volumes de dados de diversas fontes, de forma sistematizada e em tempo real?

## **5. Produtos e serviços inteligentes**

- 5.1. Os produtos contam com sistemas embarcados e inteligentes?
- 5.2. Os produtos são dotados de sistemas de inteligência artificial, com vistas à auto-otimização de suas características e de seu desempenho?
- 5.3. Os sistemas embarcados são dotados de tecnologias que permitem a comunicação com a fábrica, possibilitando a análise as condições de uso?
- 5.4. São ofertados serviços complementares aos produtos, derivados da análise de dados das preferências dos clientes e das condições de uso dos produtos?
- 5.5. Os produtos possuem projeto digitalizado, que pode ser enviado para a manufatura e para outras empresas da rede de valor?
- 5.6. São utilizados recursos e softwares para simulação digital das condições de uso e do desempenho dos produtos?
- 5.7. Os produtos e serviços são segmentados ou individualizados, atendendo à customização da demanda?
- 5.8. A sistemática e os recursos disponíveis, permitem a reconfiguração ágil das características dos produtos?
- 5.9. Os sistemas embarcados nos produtos integram-se a outros sistemas gerenciais e operacionais da empresa?





## ANEXO III – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO DO MODELO DE MATURIDADE NAS EMPRESAS SELECIONADAS

Para validar o modelo de maturidade proposto, são sugeridos alguns questionamentos para recolher informações sobre os respondentes do questionário e sobre a empresa, e a respeito da Indústria 4.0 e seus impactos.

### 4.1. Identificação e informações da empresa

- ✓ Cargos e responsabilidades dos respondentes deste questionário
- ✓ Departamentos envolvidos na gestão e implementação da Indústria 4.0
- ✓ Participação em associações empresariais e comitês relacionados a Indústria 4.0
- ✓ Possui laboratórios próprios ou em parceria outras instituições, dedicados a inovação tecnológica e projetos piloto de fábricas inteligentes?
- ✓ Qual é o volume de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (% das receitas) próprios ou em parceria com outras instituições?
- ✓ Quantos funcionários trabalham na unidade e a nível nacional?

### 4.2. Contribuições sobre a Indústria 4.0

- ✓ Principais entendimentos sobre os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0
- ✓ Tecnologias mais relevantes e impactantes para o negócio (a nível mundial)
- ✓ Tecnologias inovadoras que vêm sendo desenvolvidas ou aplicadas pela empresa
- ✓ Impactos esperados da Indústria 4.0 (positivos e negativos) para a competitividade da empresa
- ✓ Dificuldades de implementação da Indústria 4.0, considerando fatores externos à empresa (ex.: regulatórios, padronização, políticos, econômicos, acesso a tecnologias e informações, trabalhistas)
- ✓ Dificuldades de implementação por parte da empresa, do setor, e da cadeia de valor em que atua
- ✓ A empresa percebe diferença na implementação da Indústria 4.0 entre a unidade avaliada, e outras unidades a nível nacional e a nível mundial? A que atribui estas diferenças?
- ✓ Como avaliam o futuro da empregabilidade e do conteúdo do trabalho?

### 4.3. Contribuições sobre o modelo de maturidade proposto

- ✓ Percepções sobre o modelo proposto (abrangência, coerência com a realidade, objetividade, clareza, usabilidade, acurácia)
- ✓ As dimensões e capacidades propostas abrangem os principais conceitos e tecnologias da Indústria 4.0?
- ✓ Sugerem alterações, inclusões ou exclusões nas dimensões e capacidades propostas?
- ✓ O modelo é representativo para o setor industrial ao qual a empresa pertence?
- ✓ As questões propostas são suficientes para avaliar as capacidades às quais se referem?



## ANEXO IV – RESULTADOS OBTIDOS NA APLICAÇÃO DO TESTE PILOTO DO MODELO DE MATURIDADE NAS EMPRESAS SELECIONADAS

### ➤ Empresa 1: fabricante de pneus de automóveis

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</b>	Analisa continuamente os impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa a médio e longo prazos?	<b>1</b>
	Incorpora os conceitos e das tecnologias da Indústria 4.0 como principais fatores na estratégia de competição?	<b>2</b>
	Possui indicadores apropriados para monitorar o desdobramento das ações da Indústria 4.0 com objetivos e metas realistas?	<b>0</b>
	Planeja e realiza os investimentos necessários para implementar as tecnologias da Indústria 4.0?	<b>2</b>
	Possui uma estrutura organizacional orientada à inovação e incorporação de novas tecnologias?	<b>2</b>
	A alta administração e gerências disponibilizam os recursos necessários para a realização das ações de transformação?	<b>4</b>
	É realizada comunicação ágil e digitalizada com os clientes para aquisição de informações?	<b>4</b>
	As ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0 possuem como foco os requisitos do cliente?	<b>3</b>
	Há compartilhamento das informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor, para uma ágil tomada de decisões?	<b>4</b>
	Existe uma coordenação central para as ações de transformação da Indústria 4.0?	<b>4</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Equipes de trabalho</b>	Possui as habilidades técnicas e gerenciais requeridas para implementar as ações da Indústria 4.0?	<b>3</b>
	Realiza as capacitações necessárias para a aquisição de habilidades técnicas e gerenciais relacionadas aos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0?	<b>1</b>
	A estrutura organizacional e a sistemática de aprovação de decisões promovem a flexibilidade e autonomia das equipes?	<b>3</b>
	Incentiva a criatividade e empoderamento dos empregados face aos desafios e benefícios da transformação digital?	<b>3</b>
	É observada a abertura dos empregados à inovação e ao aprendizado contínuo, com uma atuação responsiva às mudanças de contexto?	<b>3</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Fábricas inteligentes</b>	As instalações fabris, os equipamentos e as facilidades de produção possuem cópias digitais?	4
	Existe atualização bidirecional de informações entre as instalações e equipamentos reais, e as cópias digitais?	4
	A infraestrutura de equipamentos e instalações possui sistemas embarcados, que possibilitam o processamento de dados, e a comunicação entre si e com outros sistemas?	4
	Os sistemas de informação, comunicação e operação, são integrados e capazes de atender os requisitos de interoperabilidade?	4
	São adquiridos dados a partir de sensores e atuadores, de forma automatizada e em tempo real?	4
	Os equipamentos são dotados de tecnologias de inteligência artificial, que possibilitam o contínuo aperfeiçoamento, capacitando-os a tomarem decisões de autonomamente?	0
	Os <i>layouts</i> de produção são reconfiguráveis de forma ágil, para atender às variações de diversificação e volume na oferta de produtos individualizados?	3
	São utilizados dispositivos móveis e vestíveis inteligentes, para otimizar as operações?	1

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Processos inteligentes</b>	São utilizadas tecnologias de <i>hardwares</i> e <i>softwares</i> para armazenamento e processamento de dados em nuvem?	4
	São utilizadas tecnologias e sistemáticas de segurança e integridade física dos ativos e dos empregados, e de proteção de dados contra roubos e utilização indevida?	4
	Os processos produtivos são capazes de operar de forma autônoma, auxiliados por sistemas de aprendizagem de máquinas?	0
	Os principais processos de negócio são projetados para uma partilha ágil de informações, internamente na empresa e com os demais parceiros do negócio?	3
	Os principais processos de negócio são digitalizados e incorporados em sistemas integrados de informação e comunicação?	4
	Os principais processos possuem recursos digitais de modelagem e simulação do desempenho?	3
	São utilizados recursos de computação visual, tais como sistemas supervisórios, sistemas de realidade virtual e aumentada, para auxiliar as operações?	2

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
	Os recursos de computação visual entregam informações e interfaces contextualizadas às tarefas?	<b>4</b>
	Os principais processos são auxiliados por sistemas de mineração de dados para processar grandes volumes de dados de diversas fontes, de forma sistematizada e em tempo real?	<b>1</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Produtos e serviços inteligentes</b>	Os produtos contam com sistemas embarcados e inteligentes?	<b>0</b>
	Os produtos são dotados de sistemas de inteligência artificial, com vistas à auto-otimização de suas características e de seu desempenho?	<b>0</b>
	Os sistemas embarcados são dotados de tecnologias que permitem a comunicação com a fábrica, permitindo a análise as condições de uso?	<b>0</b>
	São ofertados serviços complementares aos produtos, derivados da análise de dados das preferências dos clientes e das condições de uso dos produtos?	<b>2</b>
	Os produtos possuem projeto digitalizado, que pode ser enviado para a manufatura e para outras empresas da rede de valor?	<b>4</b>
	São utilizados recursos e softwares para simulação digital das condições de uso e do desempenho dos produtos?	<b>4</b>
	Os produtos e serviços são segmentados ou individualizados, atendendo à customização da demanda?	<b>4</b>
	A sistemática e os recursos disponíveis, permitem a reconfiguração ágil das características dos produtos?	<b>4</b>
	Os sistemas embarcados nos produtos integram-se a outros sistemas gerenciais e operacionais da empresa?	<b>0</b>

➤ **Empresa 2: montadora de automóveis**

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Estratégia, estrutura e cultura organizacionais</b>	Analisa continuamente os impactos da Indústria 4.0 para a competitividade da empresa a médio e longo prazos?	<b>1</b>
	Incorpora os conceitos e das tecnologias da Indústria 4.0 como principais fatores na estratégia de competição?	<b>0</b>
	Possui indicadores apropriados para monitorar o desdobramento das ações da Indústria 4.0 com objetivos e metas realistas?	<b>0</b>
	Planeja e realiza os investimentos necessários para implementar as tecnologias da Indústria 4.0?	<b>0</b>
	Possui uma estrutura organizacional orientada à inovação e incorporação de novas tecnologias?	<b>0</b>
	A alta administração e gerências disponibilizam os recursos necessários para a realização das ações de transformação?	<b>0</b>
	É realizada comunicação ágil e digitalizada com os clientes para aquisição de informações?	<b>2</b>
	As ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0 possuem como foco os requisitos do cliente?	<b>0</b>
	Há compartilhamento das informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor, para uma ágil tomada de decisões?	<b>3</b>
	Existe uma coordenação central para as ações de transformação da Indústria 4.0?	<b>1</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Equipes de trabalho</b>	Possui as habilidades técnicas e gerenciais requeridas para implementar as ações da Indústria 4.0?	<b>3</b>
	Realiza as capacitações necessárias para a aquisição de habilidades técnicas e gerenciais relacionadas aos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0?	<b>3</b>
	A estrutura organizacional e a sistemática de aprovação de decisões promovem a flexibilidade e autonomia das equipes?	<b>0</b>
	Incentiva a criatividade e empoderamento dos empregados face aos desafios e benefícios da transformação digital?	<b>0</b>
	É observada a abertura dos empregados à inovação e ao aprendizado contínuo, com uma atuação responsiva às mudanças de contexto?	<b>3</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Fábricas inteligentes</b>	As instalações fabris, os equipamentos e as facilidades de produção possuem cópias digitais?	<b>4</b>
	Existe atualização bidirecional de informações entre as instalações e equipamentos reais, e as cópias digitais?	<b>2</b>
	A infraestrutura de equipamentos e instalações possui sistemas embarcados, que possibilitam o processamento de dados, e a comunicação entre si e com outros sistemas?	<b>2</b>
	Os sistemas de informação, comunicação e operação, são integrados e capazes de atender os requisitos de interoperabilidade?	<b>3</b>
	São adquiridos dados a partir de sensores e atuadores, de forma automatizada e em tempo real?	<b>4</b>
	Os equipamentos são dotados de tecnologias de inteligência artificial, que possibilitam o contínuo aperfeiçoamento, capacitando-os a tomarem decisões de autonomamente?	<b>0</b>
	Os <i>layouts</i> de produção são reconfiguráveis de forma ágil, para atender às variações de diversificação e volume na oferta de produtos individualizados?	<b>1</b>
	São utilizados dispositivos móveis e vestíveis inteligentes, para otimizar as operações?	<b>1</b>

DIMENSÃO	QUESTÕES DE AVALIAÇÃO	NÍVEL
<b>Processos inteligentes</b>	São utilizadas tecnologias de <i>hardwares</i> e <i>softwares</i> para armazenamento e processamento de dados em nuvem?	<b>3</b>
	São utilizadas tecnologias e sistemáticas de segurança e integridade física dos ativos e dos empregados, e de proteção de dados contra roubos e utilização indevida?	<b>4</b>
	Os processos produtivos são capazes de operar de forma autônoma, auxiliados por sistemas de aprendizagem de máquinas?	<b>0</b>
	Os principais processos de negócio são projetados para uma partilha ágil de informações, internamente na empresa e com os demais parceiros do negócio?	<b>4</b>
	Os principais processos de negócio são digitalizados e incorporados em sistemas integrados de informação e comunicação?	<b>3</b>
	Os principais processos possuem recursos digitais de modelagem e simulação do desempenho?	<b>4</b>
	São utilizados recursos de computação visual, tais como sistemas supervisórios, sistemas de realidade virtual e aumentada, para auxiliar as operações?	<b>3</b>

<b>DIMENSÃO</b>	<b>QUESTÕES DE AVALIAÇÃO</b>	<b>NÍVEL</b>
	Os recursos de computação visual entregam informações e interfaces contextualizadas às tarefas?	<b>2</b>
	Os principais processos são auxiliados por sistemas de mineração de dados para processar grandes volumes de dados de diversas fontes, de forma sistematizada e em tempo real?	<b>0</b>

<b>DIMENSÃO</b>	<b>QUESTÕES DE AVALIAÇÃO</b>	<b>NÍVEL</b>
<b>Produtos e serviços inteligentes</b>	Os produtos contam com sistemas embarcados e inteligentes?	<b>0</b>
	Os produtos são dotados de sistemas de inteligência artificial, com vistas à auto-otimização de suas características e de seu desempenho?	<b>0</b>
	Os sistemas embarcados são dotados de tecnologias que permitem a comunicação com a fábrica, permitindo a análise as condições de uso?	<b>0</b>
	São ofertados serviços complementares aos produtos, derivados da análise de dados das preferências dos clientes e das condições de uso dos produtos?	<b>0</b>
	Os produtos possuem projeto digitalizado, que pode ser enviado para a manufatura e para outras empresas da rede de valor?	<b>4</b>
	São utilizados recursos e softwares para simulação digital das condições de uso e do desempenho dos produtos?	<b>0</b>
	Os produtos e serviços são segmentados ou individualizados, atendendo à customização da demanda?	<b>0</b>
	A sistemática e os recursos disponíveis, permitem a reconfiguração ágil das características dos produtos?	<b>0</b>
	Os sistemas embarcados nos produtos integram-se a outros sistemas gerenciais e operacionais da empresa?	<b>1</b>